Fundamentos de Electricidad y Electrónica

VOLUMEN I

Conceptos Fundamentales y Circuitos de C.C.

Basic Concepts and D-C Circuits

PUBLICACION DE PHILCO Ford CORPORATION • EDUCATION OPERATION

Fundamentos

de

Electricidad y Electrónica

ELECTRONIC AND ELECTRICAL FUNDAMENTALS

VOLUMEN I

CONCEPTOS FUNDAMENTALES Y CIRCUITOS DE C.C.

BASIC CONCEPTS AND D-C CIRCUITS

VOLÚMENES DE ESTA COLECCIÓN:

FUNDAMENTOS DE ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA

VOLUMEN I. *Conceptos fundamentales y circuitos de C.C.*

VOLUMEN II. *Fundamentos y análisis de circuitos de C.A.*

VOLUMEN III. *Fundamentos de las válvulas electrónicas y de los semiconductores*

CIRCUITOS Y SISTEMAS ELECTRÓNICOS

VOLUMEN IV. *Circuitos y sistemas básicos de radio*

VOLUMEN V. *Tecnología de los circuitos electrónicos avanzados*

VOLUMEN VI. *Tecnología de la electrónica industrial y de las microondas*

Conceptos Fundamentales y Circuitos de C.C.

BASIC CONCEPTS AND D-C CIRCUITS

por miembros de
Education Operations Department.

Editado por



PHILCO - FORD CORPORATION
Education Operations
UNION MEETIMG ROAD
BLUE BELL - PENNSYLVANIA 19422
1 9 7 0

Título del original en Inglés:
ELECTRONIC AND ELECTRICAL FUNDAMENTALS

Library of Congress Catalog Card Number: 59-15737.

EDICIONES EN INGLÉS

Primera edición	....	enero 1960
Segunda "	....	octubre 1961
Tercera "	....	julio 1962
Cuarta "	....	mayo 1964
Quinta "	....	agosto 1965

EDICIONES EN CASTELLANO

Primera edición	....	1962
Segunda "	....	1970

Traducido e impreso en la República Argentina por el INSTITUTO SUPERIOR DE ELECTRONICA S. A. I. C. - Tucumán 141 - Buenos Aires.

Prefacio

Este es el primero de una serie de tres volúmenes dedicados a un estudio completo de los principios fundamentales de electricidad y electrónica . El propósito de esta serie es proporcionar a los principiantes un plan completo, con el cual obtendrán un conocimiento sólido de los aspectos más avanzados de la electrónica.

En esta serie, el estudio de los principios fundamentales de la electrónica ha sido dividido en cuatro fases: conceptos físicos, corriente continua, corriente alternada y los llamados componentes "activos", tubos electrónicos y semiconductores.

Este primer volumen está dedicado al estudio de las primeras dos fases: conceptos físicos y corriente continua. Los otros dos volúmenes están dedicados a corriente continua, tubos electrónicos y semiconductores.

La introducción de la electrónica en los planes de estudio de muchas escuelas técnicas superiores y profesionales ha hecho sentir la necesidad de un tratado elemental. Por consiguiente, esta serie de textos está destinada a llenar esa necesidad, aunque pueda tener muchas otras aplicaciones.

Esta serie representa el esfuerzo común de algunos de los miembros de la Education Operations of the Education and Technical Service Division y es el resultado de una amplia experiencia en el campo de la ayuda prestada a las escuelas, la industria y las fuerzas armadas en la enseñanza y aplicación de la electrónica.

Esta experiencia en la enseñanza y en los materiales de enseñanza ha permitido discernir, comparativamente, las ventajas de los distintos métodos, habiéndose llegado a la conclusión de que el método empleado en estos textos es el más beneficioso para el estudio de los fundamentos de la electrónica.

El uso de las matemáticas se ha reducido al mínimo, aunque se supone que el estudiante ha seguido —y está siguiendo— un curso de Álgebra. Se ha tratado de mantener una íntima correlación entre la teoría y la práctica, con el fin de proporcionar una instrucción equilibrada y utilizar así, al máximo, la capacidad de aprendizaje del alumno.

El orden y los métodos de presentación de los distintos temas son lógicos y directos y no ofrecen dificultades para las clases de las escuelas profesionales superiores. Los problemas que sirven de ejemplo están ubicados en puntos estratégicos del texto, a fin de ilustrar la aplicación de los principios básicos explicados.

En la parte final de cada capítulo se incluyen ejercicios, problemas y cuestionarios. El profesor podrá, naturalmente, formular preguntas adicionales y plantear problemas adaptados a las necesidades individuales de cada clase particular.

Las ilustraciones y los ejemplos prácticos son numerosos y han sido cuidadosamente planificados para dar al estudiante el máximo posible de ayuda visual cuando sea necesario, evitando el uso de ilustraciones de poco valor didáctico.

Introducción

La electrónica puede definirse como la ciencia especializada en el estudio del comportamiento y movimiento de los electrones en todo tipo de circuito que usen dispositivos como tubos electrónicos o semiconductores.

Los modernos sistemas electrónicos tuvieron comienzos rudimentarios para llegar a abarcar, con el tiempo, casi todos los campos de la ciencia y el comercio. Estos progresos fuerón el producto del trabajo y el genio creador de gran número de hombres. Se necesitaría un volumen entero para enumerar a todos los científicos, ingenieros e investigadores que, con su esfuerzo, contribuyeron a ampliar la ciencia electrónica y difundir sus aplicaciones.

Para hallar el origen de todas las ciencias, incluyendo la electrónica, es preciso remontarse a la Grecia y Roma de la antigüedad. Ya entonces, los grandes pensadores hicieron observaciones sencillas sobre las características físicas del mundo en que vivían. Los alquimistas, en su intento de transmutar el plomo en oro, efectuaron numerosos descubrimientos que fueron utilizados más tarde por otros estudiosos para desarrollar la ciencia química. La electricidad —sus fenómenos y efectos— constituye el cimiento que ha servido de base para el estudio y la aplicación práctica de la electrónica.

Tan notables fueron los progresos alcanzados, que los equipos eléctricos y electrónicos se emplean hoy prácticamente en todos los sectores del comercio y de las actividades militares. Además, en la mayoría de los hogares se hace uso de toda clase de elementos eléctricos y electrónicos que hacen más cómoda y placentera la vida diaria.

Por otra parte, no hace falta una gran imaginación para prever que en el futuro los sistemas electrónicos tendrán una aplicación cada vez mayor en la industria y el hogar. Los satélites artificiales enviados a la atmósfera exterior por medio de cohetes, anuncian una nueva era en el deseo secular del hombre de acrecentar sus conocimientos sobre el mundo en que viven, el espacio y los planetas que lo rodean.

En el mismo plano que la astronomía, la física y la química, la electrónica ocupará una posición clave en la conquista del espacio.

El estudio de la electrónica es el estudio de una rama de la ciencia en pleno desarrollo. Quien se inicie en ella, encontrará oportunidades casi ilimitadas para satisfacer su vocación personal en alguna de sus múltiples especialidades. Sin embargo, como la electrónica es una ciencia exacta, el estudiante deberá tener el firme deseo de aprender y ser capaz de entregarse por entero a la materia objeto de su elección, para lograr un conocimiento práctico de sus principios fundamentales.

El estudio puede ser una diversión, pero exige siempre una cierta habilidad. Para lograr un conocimiento sólido de la materia, el estudiante, ante todo, deberá aprender a hacer del estudio un arte. Un buen obrero no producirá trabajo calificado si utiliza métodos deficientes. Debe saber organizarlo, planificarlo y realizarlo correctamente. Gran parte de su éxito como especialista dependerá de la aplicación de métodos de trabajo adecuados. Del mismo modo, ningún estudiante podrá adquirir buenos conocimientos si no adquiere el hábito de estudiar metódica y ordenadamente. Los hábitos —buenos o malos— se contraen por el uso y la repetición. Es importante que el estudiante adopte un buen método de trabajo, con lo cual saldrá beneficiado y aumentará sus conocimientos con el mínimo de esfuerzo y de tiempo. Es menester que el estudiante siga las sugestiones que se le ofrecen a continuación para lograr un método de estudio eficiente.

Prepárese mentalmente

En primer lugar, plantéese conscientemente por qué ha elegido esa materia y cuáles son los beneficios o ventajas que espera obtener de ella. Fíjese entonces una meta y avance resueltamente. Quizá no la alcance con la rapidez que lo desea pero, así como el camino del éxito no es corto, la senda del estudio no es fácil. Mientras estudia, ponga su mente en la meta que se ha fijado: no se desanime; recuerde que sólo aquél que abandona el estudio puede considerarse un fracasado.

Fíjese un horario regular para el estudio

Dedique una determinada cantidad de tiempo diario al estudio. Usted sabe el número de horas de que dispone; elija aquéllas que le resulten más convenientes y haga un esfuerzo serio para estudiar todos los días a la misma hora. El estudio se asemeja, en cierto modo, al adiestramiento físico: es difícil comenzar, pero cuanto más metódicamente se lo practica, más fácil resulta.

El material a estudiar

Todos los días tendrá usted que preparar las lecciones para la clase siguiente. Déles un vistazo general y encuádrelas dentro del tiempo que se ha reservado para el estudio. Concéntrese en lo que estudia y no salte de un tema a otro o perderá la ilación del pensamiento. Cada vez que comience un nuevo tema, repase el anterior y, sólo entonces, prosiga con el nuevo.

Organice el lugar donde ha de estudiar

No siempre resulta fácil disponer de las condiciones ideales que requiere el estudio; sin embargo, con un poco de empeño, podrá hallar un lugar que le permita trabajar sin distraerse. Procure tener buena luz y espacio suficiente para escribir con comodidad. Recuerde que el autoperfeccionamiento depende de lo que usted pone de su parte; por lo tanto, no espere que alguien le ofrezca un lugar para estudiar; búsquelo usted mismo.

Aprenda a concentrarse

El estudio no es tarea excesivamente difícil, pero requiere concentración. Para aumentar su capacidad de concentración bastará que se mantenga firme en sus propósitos y siga algunas reglas sencillas. Si ha decidido estudiar, debe estudiar, sin permitir que su mente se aparte del tema. Media hora de estudio concentrado es muchísimo más importante que varias horas de estudio disperso.

Impóngase un esfuerzo individual

El aprender es una tarea individual, ya que es una decisión que cada uno debe tomar libremente y en su fuero interior y, por lo tanto, no puede imponerse desde afuera. Nadie puede aprender por usted, tiene que hacerlo usted mismo. Lo que cuenta es su esfuerzo individual; no dependa de que sus amigos lo ayuden. Consulte con el profesor sobre aquellos puntos que no comprenda; cultive el hábito de confiar en usted mismo y de hacer su propio trabajo.

Haga resúmenes frecuentes

Interrumpa el estudio de vez en cuando para hacer un resumen de lo aprendido. Omita entonces los detalles y limítese a los puntos esenciales. Este esfuerzo puede llevarle algún tiempo de más, pero es uno de los mejores hábitos que puede adquirir.

Aplique sus nuevos conocimientos

Cada vez que se le presente una oportunidad, trate de aplicar los conocimientos adquiridos. Lea,

escriba y hable sobre los temas que ha estudiado. De este modo, acrecentará su comprensión general de la materia y ésta le quedará firmemente grabada en la mente.

Cómo leer con provecho

Es un hecho conocido que casi el noventa por ciento de nuestros conocimientos entran por los ojos. Por eso, es importante saber utilizar nuestra vista y aprender a leer provechosamente. Un buen método de lectura y un buen método de estudio están estrechamente ligados. Leer bien facilita mucho el estudio, y constituye una técnica que se adquiere mediante grandes dosis de lectura, es decir, con la práctica. Es indispensable, por consiguiente, que usted aprenda a leer bien. Si se acostumbra a seguir atentamente el plan de lectura que se indica a continuación, podrá aumentar considerablemente su capacidad de lectura y perfeccionar su método de estudio.

Ojeada general al texto

Examine el texto que ha de leer para tener una idea general de su extensión y una impresión de conjunto de los temas a estudiar. En esta etapa preliminar de la lectura, se tomará nota, sencillamente, de los títulos y subtítulos principales del texto.

En primer lugar, lea en forma rápida la totalidad del tema

Esta primera lectura rápida tiene por objeto dar una idea general del asunto de que se trata. Es necesario que comprenda perfectamente las partes, los principios y hechos más importantes. Tome nota de todas las reglas y definiciones, pero no intente memorizarlas todavía.

Efectúe una lectura lenta y cuidadosa

En esta segunda lectura deberá detenerse en los detalles así como en los puntos esenciales. Trate de asimilar el máximo posible. Utilice el diccionario para verificar el significado de las palabras nuevas. Estudie cuidadosamente todos los diagramas, dibujos, gráficos, etc. Un buen dibujo vale por mil palabras; cerciórese de que comprende todas las ilustraciones y los textos correspondientes. Tome nota de los puntos importantes o subraye a medida que lee. Es de gran importancia hacer anotaciones que podrá usted repasar con frecuencia.

Vuelva a leer cualquier parte del texto que no haya entendido por completo, y concéntrese en los párrafos difíciles hasta que logre dominarlos.

Una última lectura le servirá de repaso general

Este repaso tiene por finalidad fijar el tema en su mente. Lea tan rápidamente como le sea posible, pero no sacrifique la comprensión a la velocidad. Después de esa lectura final verifique si sus anotaciones abarcan todos los puntos importantes del texto.

LA TEORÍA Y LA PRÁCTICA

Para llegar a ser un técnico especialista en electrónica, el estudiante deberá adquirir previamente un conocimiento sólido de la teoría, el diseño y la construcción de los equipos electrónicos. Además, deberá desarrollar su habilidad mecánica a fin de aplicar con éxito sus conocimientos. Aun cuando la localización de un defecto en un circuito electrónico se realice a la perfección y con toda rapidez, los resultados no serán satisfactorios si la reparación no es igualmente perfecta, como corresponde al nivel de un técnico especialista.

Es propósito del libro Fundamentos de Electricidad y Electrónica ofrecer una sólida base teórica para los trabajos con circuitos eléctricos y electrónicos, y presentar aquellas informaciones que sean más útiles para el empleo adecuado de los equipos de ensayo y de otros instrumentos generales utilizados para la construcción, instalación y reparación del equipo electrónico.

SEGURIDAD Y PRECAUCIONES

La primera lección que debe aprender todo ingeniero o técnico se refiere a las reglas de precaución y seguridad que ha de observar a diario en su especialidad. La limpieza del laboratorio o taller es una de las reglas que deben tenerse en cuenta, pero es sólo una; un programa completo de seguridad del laboratorio incluye medidas de precaución sobre el trabajo de la maquinaria, el polvo, el humo, el fuego y el suministro de altas tensiones. Un programa realista de seguridad comprende una serie de procedimientos y sistemas bien estudiados que se adapten a las necesidades particulares de una escuela o de una organización.

Este programa no sólo es esencial para el bienestar del individuo, sino que es de vital importancia para el funcionamiento adecuado del laboratorio. El éxito del programa de seguridad del laboratorio o taller depende de las personas que lo utilicen.

El piso de un laboratorio debe estar limpio y ordenado en todo momento. Las basuras, herramientas y otros elementos deben colocarse en su lugar correspondiente y no sobre el piso. No se usarán cajas de cartón, madera u otro material combustible para el depósito temporario o permanente de

los residuos. Los recipientes para la basura deben construirse de metal o de algún material a prueba de fuego. También los trapos, limpios o sucios, se guardarán en recipientes metálicos. Es preciso eliminar las basuras y los residuos tan pronto como sea posible. Los materiales inflamables no se almacenarán cerca de aparatos a llama desnuda, sistemas de calefacción a vapor, hornos y otros elementos similares productores de calor.

Los bancos de trabajo, maquinarias, herramientas y otros equipos generales deben estar libres y apartados de todo residuo, partes en desuso y de cualquier herramienta o equipo de ensayo que no se utilice. El laboratorio bien planificado dispone de un lugar para cada herramienta.

Maquinaria

La maquinaria del taller sólo estará a cargo del personal especializado. Cuando se trabaja cerca de una máquina, no debe usarse ropa suelta y tampoco prendas sueltas que, como las corbatas, cuelgan y sobresalen del cuerpo. Después de utilizar una máquina, hay que desconectarla totalmente, limpiarla y dejarla preparada para la próxima tarea.

Cuando se emplean máquinas afiladoras, tornos u otras similares coresponde el uso de anteojos protectores.

Incendio

Deben tomarse precauciones generales contra el incendio en todo momento. La limpieza del taller es un buen preventivo contra el fuego. Los materiales inflamables deben conservarse a suficiente distancia de los elementos calefactores o de las llamas desnudas. Los líquidos inflamables deben manejarse con cuidado y almacenarse en recipientes de probada seguridad. Mientras no se los utiliza, se mantendrán depositados en lugares especiales. Siempre que se haga uso de líquidos inflamables como los solventes, el querosene o la nafta, se conservará el lugar bien ventilado y se retirarán todas las unidades calefactoras, especialmente los sopletes a llama desnuda.

El estudiante debe conocer la ubicación de los sistemas de alarma y la manera de ponerse en contacto con la seccional de bomberos. Debe saber dónde se encuentran los extintores, cómo manejarlos y para qué tipo de incendio están diseñados. Algunos de los tipos de extintores más corrientes son los siguientes:

1. *Tetracloruro de carbono*: Este extintor es una pistola a bomba que contiene tetracloruro de carbono. Generalmente se coloca en los lugares en que pueden provocarse incendios pequeños Como el tetracloruro de carbono *no es conductor de la electricidad,* puede utilizarse para el *equipo electrónico.*

2. *Bióxido de carbono* (CO_2): Estos extintores de gas se utilizan en varios tamaños. Su contenido puede utilizarse en cualquier incendio, especialmente en incendios eléctricos.

3. *Soda-ácido*: Estos extintores, de unos diez litros de capacidad, son de uso corriente en todas las secciones, excepto allí donde se trabaje con cera, aceites, lacas, solventes, pinturas, compuestos, etc. Estos extintores contienen aproximadamente diez litros de agua en la que se encuentra disuelta una cantidad de bicarbonato de soda y, además, una botella de vidrio con una pequeña cantidad de ácido sulfúrico que se mantiene sobre el nivel del agua. Al dar vuelta el extintor de arriba hacia abajo, el ácido sulfúrico y el agua de soda se mezclan iniciándose una reacción química que produce un gas que expulsa el contenido del extintor en un chorro fino, hasta una distancia de 6 metros más o menos. Una vez que el extintor ha comenzado a actuar, la descarga no puede detenerse pues, si se lo intenta, la presión del gas puede hacer explotar el extintor con grave peligro. Este líquido es *conductor de la electricidad* y no debe utilizarse en incendios de origen eléctrico. *Tampoco* debe emplearse para incendios de elementos compuestos como el petróleo, pues el agua no sirve para apagar incendios de este tipo. Sin embargo, tiene resultados satisfactorios en los incendios comunes. Para hacerlo funcionar, se da vuelta y se dirige el chorro hacia el fuego. Este tipo de extintor generalmente no se utiliza en los talleres electrónicos.

4. *Tipo a espuma*: Es un extintor de diez litros aproximadamente, similar al anterior en tamaño y diseño, pero con contenido diferente. Dentro de los 10 litros de agua está disuelto un producto químico que produce el gas al mezclarse con otro producto químico y una pequeña cantidad de agua de un tubo ubicado por encima del nivel normal. La presión resultante expulsa la espuma del extintor. Es muy efectivo en el incendio de elementos compuestos, petróleo y materias similares, pero *no puede utilizarse en incendios de origen eléctrico* pues es conductor de la electricidad.

Alta tensión

Aun cuando los conocimientos que posee el estudiante de electrónica sean por ahora limitados, ha de estar familiarizado con la palabra "tensión" y "corriente". Observar las precauciones adecua-

das con respecto a la tensión y la corriente constituye una responsabilidad de todo el personal vinculado a la instalación, funcionamiento y mantenimiento del equipo eléctrico o electrónico, o de aquél dedicado a la preparación de personal para esos equipos.

La seguridad no debe depender únicamente de los dispositivos de seguridad, tales como llaves protectoras y relés de alta tensión; debe utilizarse también guantes de goma siempre que resulte práctico. Los pies se mantendrán alejados de todo objeto que se halle en el piso, apoyándolos sobre una buena alfombra de goma. Cuando se realizan ensayos de alta tensión, se pondrá la mano en el bolsillo o en la espalda, y siempre deberá estar presente una persona capaz de aplicar los primeros auxilios en caso de shock eléctrico. Se utilizarán puntas de prueba para asegurarse de que el circuito está desconectado, y se recomienda el uso de fusibles normalizados.

Muchas veces los operarios sufren accidentes o mueren por causa de un equipo de alta tensión *que se suponía desconectado*. La única forma de estar completamente seguro, es desconectar la línea fijando la llave en la posición NO.

RESUMEN

El desarrollo de la electrónica permite satisfacer las necesidades del hombre en una civilización que se organiza y perfecciona sin cesar. Estas necesidades nunca se verán plenamente colmadas ya que la mente del hombre aporta continuamente nuevos elementos al desenvolvimiento de esta ciencia.

El estudio de la electrónica requiere que el estudiante respete siempre las precauciones de seguridad que exige su trabajo. Para lograr el conocimiento integral de la especialidad que ha elegido, es requisito indispensable que el estudio concentrado y efectivo se convierta en un hábito que sea parte fundamental de sus herramientas de trabajo.

CAPITULO I

Fundamentos Físicos

1-1 Introducción

La Física es una de las ciencias que más ha contribuido a un conocimiento de la naturaleza de la electricidad y la electrónica. Muchos de los principios fundamentales de física están directamente relacionados con el estudio de la electrónica. De particular importancia son aquellos principios que conciernen a la estructura atómica de la materia, electrostática, sistemas de medida, trabajo, energía y potencia.

Las primeras explicaciones del comportamiento de la electricidad fueron teorías presentadas por varios científicos. Las propiedades de la electricidad con sus características definidas han permitido a los hombres de ciencia verificar, a través de experimentos, algunas de las teorías que explican la acción eléctrica y de esta forma, desarrollar estas teorías en leyes. En el curso de la vida diaria la electricidad se transforma en energía calórica, energía sonora, energía luminosa y energía mecánica, en artefactos como tostadoras, sistemas amplificadores, tubos de televisión y motores eléctricos. La civilización moderna depende de equipos electrónicos para dos propósitos, producción y comodidad.

Este capítulo presenta unos pocos de los principios básicos de física que se requieren para un entendimiento de la electrónica. Comienza con el estudio de la estructura atómica de la materia proporcionando una base para explicar la naturaleza de la corriente eléctrica.

1-2 ESTRUCTURA ATÓMICA

La estructura básica de todos los materiales que se ven o usan diariamente concuerda con un modelo conocido como estructura atómica de la materia. Cuando un edificio está en construcción, tiene etapas definidas que siguen los constructores desde su comienzo hasta su terminación. Los materiales usados en la construcción: vigas de hierro, ladrillos, cemento, cal, etc. —cuando se utilizan en un orden y cantidades apropiados— forman un edificio. Este concepto de partes definidas en un orden apropiado puede ser aplicado a la estructura básica de toda materia.

Materia es cualquier cosa que tiene masa y ocupa espacio. La materia puede presentarse en diversos estados: puede ser un líquido como el agua, un gas como el oxígeno o un sólido como la piedra. La materia, como nosotros la conocemos, normalmente tiene peso, porque cualquier cosa que tiene masa y está sobre o cerca de la Tierra es influenciada (atraída) por la fuerza de la gravedad terrestre. La materia puede estar constituida por un elemento simple o puede ser una combinación de dos o más elementos.

Un *elemento* es una sustancia que no puede ser cambiada por procedimientos químicos. Recientemente se han alterado o cambiado elementos por medios eléctricos, como en el desarrollo original de la bomba atómica. Hay 92 elementos naturales y un cierto número de elementos producidos por la mano del hombre, conocidos en el campo de la ciencia. Estos elementos pueden ser mezclados y combinados en gran cantidad de formas diferentes; este hecho explica las numerosas y diferentes sustancias y materiales que se encuentran en el mundo. Cuando los elementos hierro, carbón y manganeso se mezclan en un horno, se obtiene el acero. El acero es una *mezcla* de elementos básicos. Si se combinan cantidades apropiadas de oxígeno e hidrógeno, en condiciones adecuadas, se produce una reacción química cuyo resultado es el agua. Dado que en este caso los elementos están combinados químicamente y no mezclados, el agua es un *compuesto.*

La partícula más pequeña a que puede reducirse un compuesto sin perder sus características originales es la *molécula.* La molécula contiene una combinación química exacta de cada uno de los elementos que forman el compuesto. Como queda establecido, las mezclas y los compuestos están constituidos por elementos y, por consiguiente, podemos imaginar a los elementos como los "ladrillos" constituyentes de la materia.

El átomo

La materia ha sido descrita como un compuesto de elementos en diversas combinaciones. La investigación científica ha permitido determinar que la partícula más pequeña a la cual puede reducirse un elemento, sin perder sus características originales, es el *átomo.*

En la figura 1-1 A se representa gráficamente

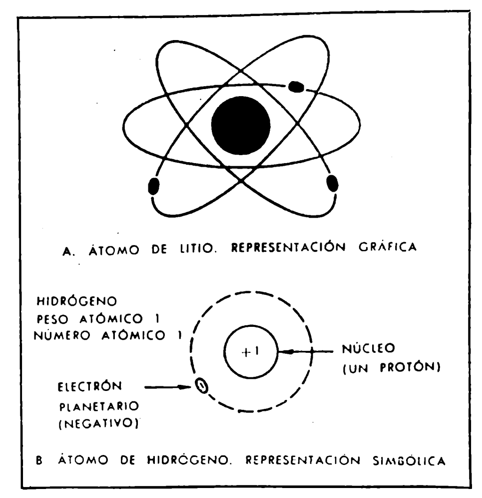


Figura 1-1. Métodos de representación del átomo

un átomo, en este caso el átomo del litio. De forma similar a nuestro sistema solar, el átomo consiste en un cuerpo central relativamente grande con pequeños cuerpos girando en órbitas alrededor de él. El átomo es tan pequeño que no puede ser visto ni aun con la ayuda de un poderoso microscopio.

El átomo más simple, el de hidrógeno, está representado simbólicamente en la parte B de la figura. Este átomo consiste en un cuerpo central con un cuerpo pequeño que gira alrededor del centro en una órbita. El cuerpo central se llama *núcleo* y el que gira, o cuerpo planetario, se llama *electrón.* Se cree que el núcleo del átomo de hidrógeno es una partícula unitaria *positiva* llamada *protón.* El electrón es una partícula unitaria *negativa.* El átomo de hidrógeno se considera neutro porque está compuesto por una partícula positiva y una partícula negativa. Si el núcleo positivo, o protón, se representa por el signo positivo (+), y el electrón negativo, por el signo ne-

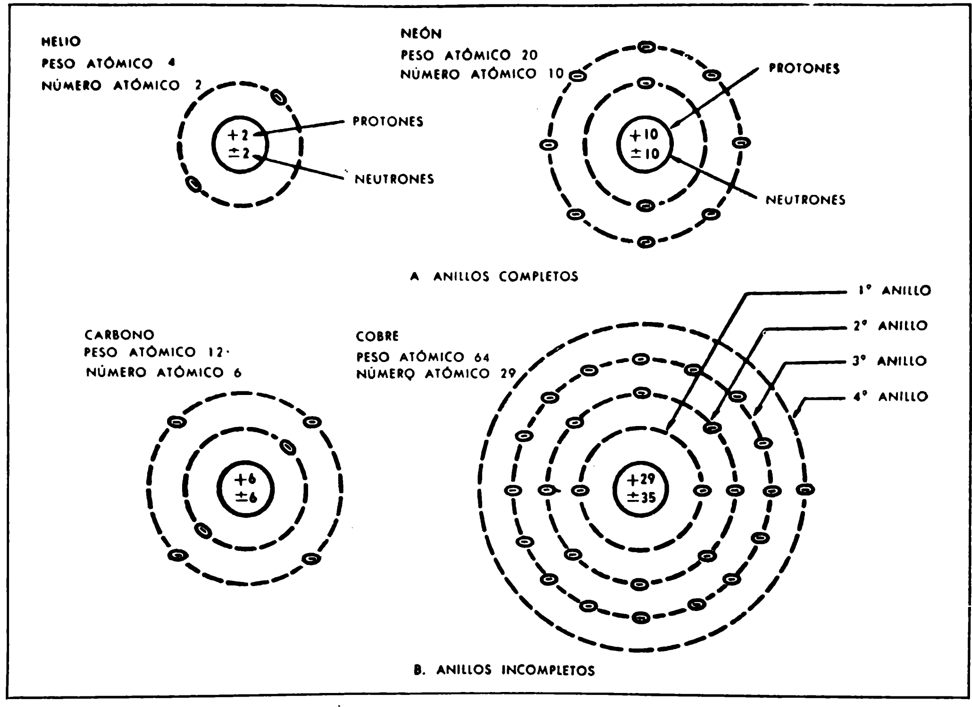


Figura 1-2. Atomos con anillos exteriores completos e incompletos

gativo (—), las simples reglas del álgebra demuestran esa neutralidad.

$$(+1) + (-1) = 0$$

Un elemento, como ya se ha mencionado, es una sustancia que contiene un material simple que no puede ser subdividido químicamente. Cada elemento está constituido por un solo tipo de átomos, y estos átomos tienen un número definido de electrones y protones que dan al elemento sus características individuales.

Los electrones que rodean al núcleo de cualquier átomo están acondicionados en órbitas o anillos. La cantidad total de electrones que contiene cada anillo no puede exceder de un cierto número máximo. Este número máximo es:

El primer anillo (o interior)	dos electrones
El segundo anillo	ocho electrones
El tercer anillo	dieciocho electrones
El cuarto anillo	treinta y dos electrones
El quinto y sexto anillos	más de treinta y dos electrones

pero en los elementos conocidos al presente, no están nunca completos.

Si se examina el número de electrones en cada anillo de cada tipo de átomo, se revelan las siguientes restricciones adicionales:

El anillo exterior no puede contener más de ocho electrones.

El anillo que sigue al exterior no puede contener más de dieciocho electrones.

El anillo exterior no puede contener más de dos electrones si el anillo siguiente al exterior no alcanza a tener el máximo.

La parte A de la figura 1-2 ilustra dos átomos (helio y neón) con anillos exteriores completos, y la parte B muestra dos átomos (carbono y cobre) con sus anillos exteriores parcialmente completos.

Uno de los métodos usados para identificar los

átomos de un elemento consiste en determinar su peso en relación al de los átomos de otro elemento tomado como base de referencia. Este peso relativo es conocido como el *peso atómico* del elemento. El oxígeno fue uno de los primeros elementos investigados por los hombres de ciencia, quienes le asignaron un peso atómico de 16. El núcleo del átomo de oxígeno está constituido por ocho protones y ocho neutrones. El *neutrón* es otra partícula que existe en los núcleos atómicos conjuntamente con los protones; como su nombre lo sugiere, el neutrón es neutro, conteniendo una partícula unitaria positiva y una partícula unitaria negativa. El espacio o volumen que un neutrón ocupa en el núcleo es esencialmente el mismo que el ocupado por un protón.

Por medio de cuidadosos experimentos, el peso de un protón ha sido calculado en 1.845 veces el de un electrón. Dada la gran diferencia de peso y el hecho de que un protón y un neutrón son aproximadamente iguales en masa, el peso atómico total de cualquier átomo es prácticamente la suma del número de sus protones y neutrones. La figura 1-2 permite comparar el peso atómico de varios átomos.

Los átomos que constituyen los distintos elementos también pueden identificarse por su *número atómico*. El número atómico representa el número total de electrones planetarios. Por ejemplo, en el átomo de carbono de la figura 1-2, el número atómico es seis.

Cargas positivas y negativas

Anteriormente establecimos que un electrón y un protón son unidades de partícula negativa y positiva. Usaremos en adelante la palabra carga en lugar de unidad de partícula, para facilitar su comprensión. La palabra carga implica una fuerza potencial. Por ejemplo, se dice que un arma está cargada si está en condiciones de tirar. Cuando un átomo determinado es neutro, o balanceado, las cargas negativas equilibran las cargas positivas y la carga neta del átomo es cero.

Carga de electrones + carga de protones = carga del átomo

$$(-29) + (+29) = 0$$

Si por medio de una fuerza externa se expulsa un electrón de la órbita exterior, el átomo deja de ser neutro. Supongamos que se extrae un electrón del átomo de cobre. Cuando esta acción tiene lugar, el átomo de cobre se transforma en un *cuerpo positivo* con una carga neta de +1, debido a la falta de un electrón para hacerlo neutro.

Carga del electrón + carga del protón = carga del átomo

$$(-28) + (+29) = +1$$

Inversamente, si por medio de una fuerza externa se obliga a un electrón adicional a entrar en la órbita externa de un átomo de cobre, el átomo se convierte en un *cuerpo negativo* con una carga neta de —1.

Carga del electrón + carga del protón = carga del átomo

$$(-30) + (+29) = -1$$

Al hacer del átomo de cobre un cuerpo positivo, surge la pregunta ¿qué le sucede al electrón? Siempre que se expulse un electrón de su órbita por la acción de alguna fuerza externa, éste se convierte en un *electrón libre*. Los electrones libres son electrones que han sido expulsados de su órbita y están libres para moverse entre los átomos del material. La fuerza externa que origina que el electrón sea liberado, da al electrón libre movimiento y por lo tanto velocidad.

El movimiento de electrones libres se observa en la figura 1-3 donde una fuerza externa momentánea expulsa un electrón del átomo A, originando un átomo de carga positiva. El electrón del átomo A, dotado de velocidad, choca con un electrón de la órbita externa del átomo B. En la colisión, el electrón del átomo A se fija en la órbita externa del átomo B, pero desplaza un electrón de esta órbita. Debido a la igualdad en el cambio de electrones en la órbita externa, el átomo B continúa manteniendo su estado de equilibrio. El mismo proceso de desplazamiento y choque del electrón libre ocurre con los átomos C y D. La velocidad del electrón libre saliendo del átomo D es ahora bastante baja debido a los tres choques. Con la entrada a la órbita externa del átomo A de ese electrón libre, se restablece el estado de equilibrio de la órbita.

La figura 1-3 y lo estudiado aclaran un concepto muy importante: cuando la aplicación de una fuerza a un material hace que los electrones de ese material se desplacen de un átomo a otro, el resultado es un flujo de *cargas eléctricas negativas*, o dicho en otras palabras: una corriente eléctrica es el flujo o movimiento de electrones de un átomo a otro.

1-3 CONDUCTORES Y AISLANTES

En el estudio de la estructura atómica de la materia, observamos que todo material es básicamente de naturaleza eléctrica. Cada átomo tiene sus propias características definidas: algunos átomos tienen completa su órbita externa y otros

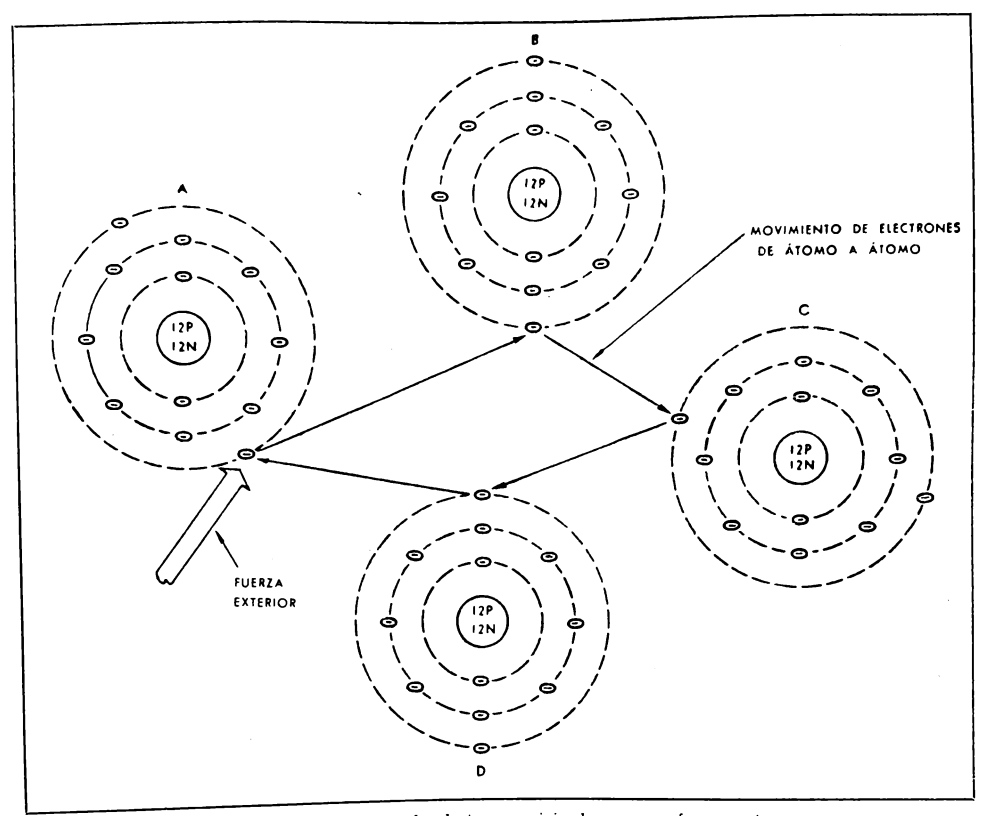


Figura 1-3. Movimiento de electrones originado por una fuerza externa

átomos la tienen incompleta. Por esta causa, algunas sustancias conducen una corriente eléctrica rápidamente y son conocidas como conductoras, mientras que otras lo hacen lentamente y se denominan aislantes. Como regla general, un conductor es una sustancia cuya estructura atómica es tal que la órbita exterior contiene menos de la mitad del número total posible de electrones; y un aislante es una sustancia cuya órbita externa contiene más de la mitad del número total de electrones posible.

Conductores

Un buen conductor de corriente eléctrica es una sustancia que tiene un gran número de electrones que se convierten fácilmente en electrones libres cuando el material es sometido a una fuerza externa. Este material puede estar constituido por uno o más elementos; es la estructura atómica del material la que determina su capacidad para permitir que una corriente eléctrica fluya.

Todo metal es conductor de corriente eléctrica, pero algunos lo son más que otros. Entre los conductores de uso común podemos citar, por ejemplo, la plata, el cobre y el aluminio. Mediante pruebas de laboratorio se ha podido determinar que la plata es el mejor conductor de la corriente eléctrica; sin embargo, las cantidades limitadas de plata disponible y su alto costo impiden su uso en aplicaciones comunes. El cobre es el metal más

corrientemente utilizado como conductor, debido a su costo relativamente bajo y a su buena capacidad conductora.

Aislantes

Un aislante es un material que tiene pocos electrones convertibles en electrones libres. En el estudio del flujo de corriente eléctrica y conductores, se vio que algunos materiales están compuestos de átomos que pierden fácilmente electrones de sus órbitas cuando actúa sobre ellos una fuerza externa. Lo opuesto también es verdad: algunos materiales están compuestos de átomos que no pierden fácilmente electrones. Tales átomos retienen los electrones en sus órbitas, aunque se les aplique la misma fuerza externa que produce el movimiento de electrones en un material conductor.

Ningún material es un aislante perfecto. Cualquier material puede llegar a permitir una corriente de electrones de átomo a átomo si se le aplica una fuerza externa suficiente. Siempre que un material clasificado como aislante es obligado a conducir una corriente eléctrica, se dice que hay *ruptura* de la aislación. Algunos de los materiales aislantes comunes en uso son: vidrio, porcelana y goma. Debe observarse que los materiales aislantes comunes son todos compuestos; no existen elementos naturales que puedan ser usados como aislantes en electricidad o electrónica.

1-4 ELECTRICIDAD ESTÁTICA

Desde la antigüedad se conoce el comportamiento de los cuerpos cargados eléctricamente. Los antiguos griegos observaron que se producía una fuerza invisible cuando se frotaba un material amarillento y resinoso llamado ámbar con un trozo de piel. Esta fuerza invisible hacía que trocitos de papel y raspaduras de madera fueran atraídos por el ámbar. Más tarde se descubrió que muchas otras sustancias, tales como el vidrio frotado con seda, o la goma frotada con piel o lana, producían el mismo efecto de atracción que el ámbar sobre objetos no metálicos livianos.

En el año 1600 se realizó un intento de explicar esta fuerza invisible. Un científico llamado Wilson Gilbert clasificó todas las sustancias conocidas en dos grupos: *eléctricas* y *no-eléctricas*. Toda sustancia que poseyera las mismas propiedades que el ámbar era eléctrica, aquélla que no las poseyera era una sustancia no eléctrica. La palabra *electricidad* deriva de la palabra griega *elektron* (que significa ámbar) y es ahora un término de uso diario.

En el siglo XVIII, Benjamín Franklin y un francés llamado Du Fay experimentaron con materiales electrificados. Du Fay observó que cuando se frotaba un trozo de vidrio con un trozo de piel de gato, el vidrio y la piel se electrificaban. El vidrio atraía los objetos que eran repelidos por la piel de gato y viceversa. De esta observación dedujo que allí existían dos clases de energía eléctrica exactamente opuestas. Benjamín Franklin también observó esas dos diferentes cargas e introdujo los términos *positivo* (+) y *negativo* (—) como un medio de identificarlas. Franklin definió como cuerpo cargado positivamente a aquél que tiene la misma carga o acción que una pieza de vidrio frotada con una tela de seda; y como cuerpo cargado negativamente, a aquél que tiene la misma carga o acción que un trozo de goma frotada con una piel de gato. Franklin también definió como cuerpo eléctricamente neutro a aquél que no puede ser cargado por ningún método. Las experiencias realizadas por Franklin, Du Fay y muchos otros científicos, invalidaron la teoría de William Gilbert según la cual toda la materia estaba dividida en dos clases, eléctrica o no-eléctrica. Más aún, esos estudios han sido la base de la actual explicación de la estructura básica de la materia.

La electricidad estática trata las acciones y reacciones entre cuerpos cargados eléctricamente. Un buen ejemplo de electricidad estática es la carga eléctrica producida cuando una persona camina sobre una gruesa alfombra de lana. Algunos electrones de la alfombra se acumulan en la persona. Si después ésta toca un objeto metálico, tal como una lámpara de pie, el exceso de electrones se precipitará de la persona al objeto con acompañamiento de chispas y, tal vez, de un leve shock eléctrico.

Atracción y repulsión de cuerpos cargados

Antes que pueda ocurrir el fenómeno de atracción y repulsión eléctrica entre dos cuerpos, éstos deben adquirir una carga eléctrica. Como se ha visto, la carga de los cuerpos puede efectuarse por medio de frotación o fricción. Estos métodos de carga, o electrificación de cuerpos, se explican fácilmente aplicando la moderna teoría de la estructura atómica de la materia. Los dos cuerpos deben ser diferentes y deben estar compuestos de átomos cuya órbita exterior sea tal que una esté casi completamente llena de electrones y la otra esté comparativamente vacía. Aunque la estructura molecular de los cuerpos es neutra dentro de ellos mismos, desarrollan, por contacto, una carga con

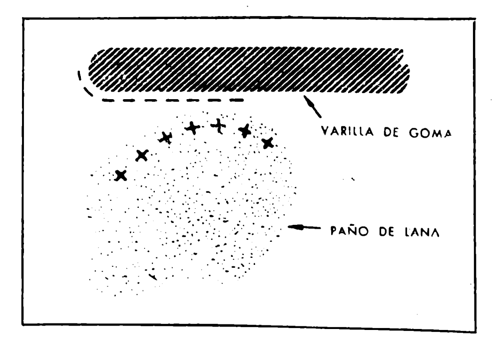


Figura 1-4. Electrificación de una varilla de goma utilizando un paño de lana

respecto a cada uno de los otros. Como muestra la figura 1-4, cuando un trozo de género y una varilla de goma se ponen en contacto, la fuerza de la fricción superficial hace que un considerable número de electrones pasen del género de lana a la varilla de goma. (La fricción de la varilla de goma

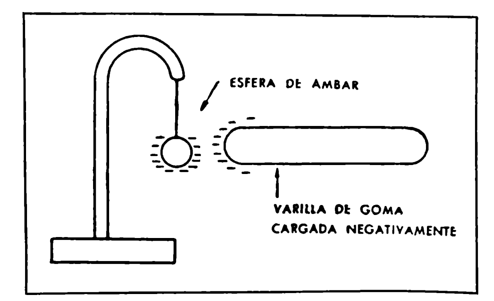


Figura 1-5. Transferencia de una carga negativa

con el género de lana estimula simplemente la transferencia de electrones). Por consiguiente, la varilla de goma, que ha adquirido un exceso de electrones en sus órbitas exteriores, posee una carga negativa; y la lana, que ha perdido electrones, tiene carga positiva. Estas cargas no se mantienen salvo que los cuerpos se separen después del contacto.

Si la varilla de goma cargada negativamente es puesta en contacto con un cuerpo neutro, tal como una esfera de médula de saúco, los electrones escaparán de la superficie de la varilla al cuerpo neutro hasta que se alcanza un estado de equilibrio entre los dos cuerpos. La figura 1-5 ilustra el

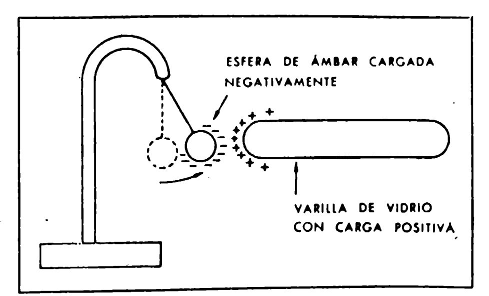


Figura 1-6. Atracción de cargas de signo contrario

resultado. La esfera de médula ha obtenido ahora un exceso de electrones con respecto a su situación neutra original.

Cuando se pone en contacto una varilla de vidrio con un género de seda, los electrones pasan desde la superficie exterior de la varilla de vidrio al género de seda; de ese modo, la varilla queda cargada positivamente y el género, cargado negativamente. Observando la figura 1-6, cuando la varilla de vidrio cargada positivamente se coloca cerca de la esfera de médula cargada negativamente, la esfera es atraída por la varilla de vidrio. Esta acción confirma una ley de electrostática que dice:

Las cargas distintas se atraen.

Cuando dos esferas de médula cargadas negativamente son colocadas una próxima a la otra, como en la figura 1-7, las dos esferas se repelen. Esta acción demuestra otra ley de electrostática que dice:

Las cargas iguales se repelen.

Si las esferas de la figura 1-7 hubieran estado cargadas positivamente, se produciría la misma acción de repulsión.

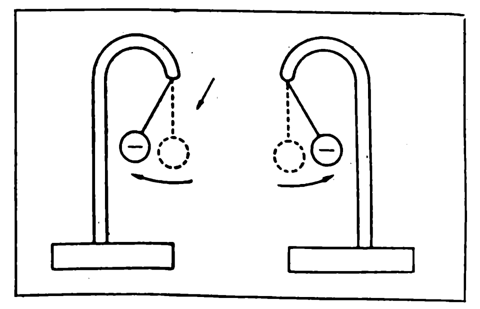


Figura 1-7. Repulsión entre cargas de igual signo

Campo electrostático

La atracción o repulsión de los cuerpos cargados eléctricamente se deben a una fuerza invisible llamada *campo electrostático*, que rodea a los cuerpos cargados. La figura 1-8 representa gráficamente un campo electrostático entre cargas iguales y cargas desiguales. Cada línea tiene una dirección definida y se denomina *línea de fuerza electrostática*. La figura 1-9 muestra el método convencional de representación de líneas de fuerza respecto a las cargas eléctricas. Debe notarse que

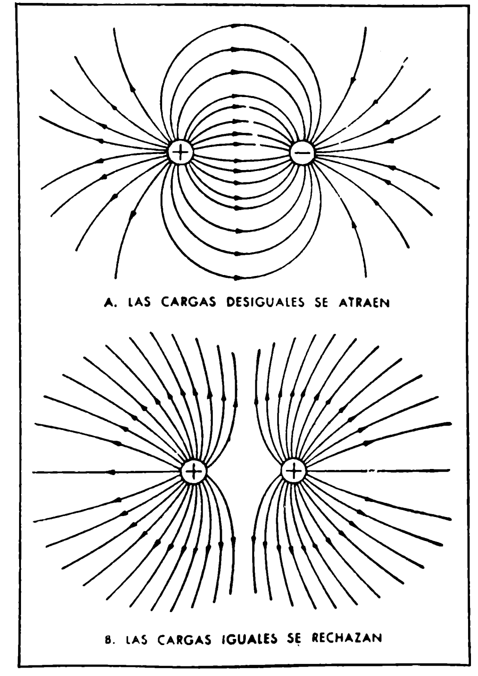


Figura 1-8. Campo electrostático alrededor de cargas eléctricas de signos contrarios y de signos iguales

las líneas de fuerza parten desde la carga positiva y convergen hacia la carga negativa.

Un físico francés, Charles Coulomb, estableció a través de experiencias, ciertos principios que se usan como base para determinar la magnitud de la fuerza entre dos cuerpos cargados.

La figura 1-10 muestra el método empleado por Coulomb para medir esta fuerza. El principio fundamental establecido por las experiencias es conocido como **Ley de fuerza** o **Ley de Coulomb**. Esta ley puede ser expresada como sigue:

La fuerza con la cual dos cuerpos cargados eléctricamente se atraen o repelen, es proporcional a la magnitud de las dos cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia existente entre ellas.

Para facilitar la aplicación de la ley de Coulomb, se la puede expresar como una fórmula matemática. *

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{d^2} \qquad (1\text{-}1)$$

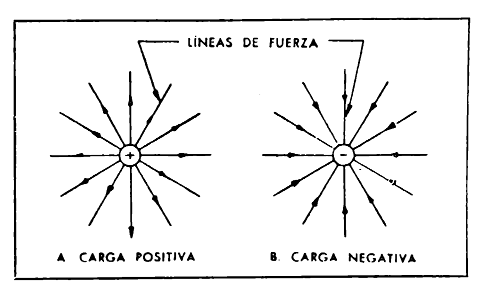


Figura 1-9. Métodos de representación de líneas de fuerza alrededor de cargas positivas y negativas

Donde

F = fuerza eléctrica
Q_1 = magnitud de una de las cargas
Q_2 = magnitud de la otra carga
d = distancia entre los centros de las cargas.

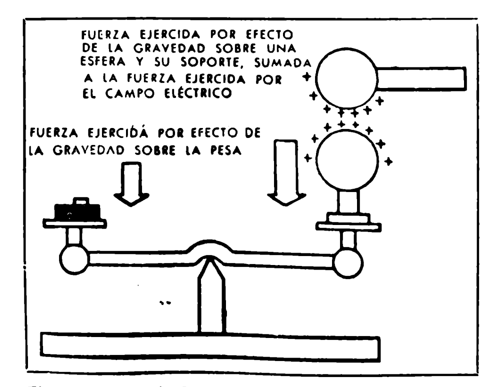


Figura 1-10. Métodos para medir la fuerza producida por cuerpos cargados eléctricamente

* Esta fórmula es correcta para cargas en el vacío y en el aire.

A través de experiencias más completas y asignando valores a F, Q y d, se estableció la unidad de carga. Esta unidad es llamada *Unidad electrostática de carga* (u.e.c.). Se determinó que una unidad electrostática de carga representa aproximadamente 2 billones de electrones. No obstante la gran cantidad de electrones que representa, la u.e.c. es muy pequeña para su aplicación.

En honor de Charles Coulomb se adoptó una unidad mayor de carga eléctrica: el coulomb, equivalente a 6,28 billones de billones de electrones. En lo que concierne a un campo electrostático, conviene recordar un hecho importante: que las líneas de fuerza alrededor de una carga eléctrica tienen dirección e intensidad.

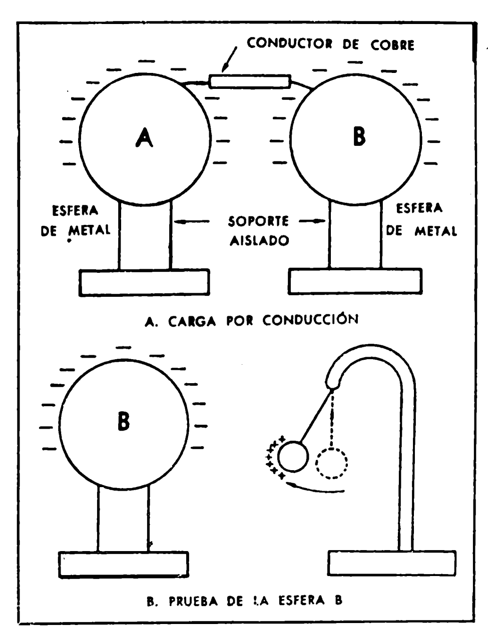


Figura 1-11. Electrificación por conducción

Electrificación

El método de carga de una esfera de médula usando una varilla de vidrio o goma se denomina electrificación *por contacto*. Existen otros dos métodos para cargar eléctricamente un cuerpo neutro. Estos métodos son: *conducción* e *inducción*. Para entender la electrificación por conducción, supongamos que una esfera de metal ha sido cargada negativamente. Esta esfera de metal se designa como esfera A en la parte A de la figura 1-11. Una segunda esfera, la esfera B, que tiene carga neutra, está ubicada cerca de la esfera A. Se coloca un conductor de cobre para que toque ambas esferas y luego es retirado. Si se coloca luego la esfera B cerca de una esfera de médula que está cargada positivamente, como en la parte B de la figura, la esfera de médula será atraída por la esfera metálica B. La primera conclusión que se deduce de este experimento, es que los electrones fueron obligados a desplazarse desde la esfera A a la esfera B a través del conductor, con lo cual la esfera B queda cargada negativamente. La segunda conclusión es que dos cuerpos diferentemente cargados, en este caso uno negativo y uno neutro, proporcionarán la fuerza requerida para producir un movimiento de electrones a través de un conductor (flujo de corriente).

La electrificación por inducción se produce cuando una carga en un cuerpo produce una carga en otro cuerpo, sin el uso de un conductor físico entre ellos. Si observamos la serie de dibujos en la figura 1-12 resulta evidente que, en la parte A, la carga negativa en la placa 1 hace que los electrones sean repelidos hacia el costado derecho de la placa 2. En la parte B, la llave interruptora está cerrada, con lo cual permite a los electrones repelidos por la carga de la placa 1 desplazarse a tierra. (Suelo, o tierra, es siempre considerado un cuerpo neutro). Cuando se abre la llave, poco tiempo después, la placa 2 tiene un déficit de electrones debido a la corriente de electrones hacia tierra. En la parte C, se prueba la placa 2 con una carga negativa: la atracción resultante indica que la placa ha sido cargada positivamente por inducción.

Las consideraciones anteriores se refieren a la carga de un cuerpo; lo inverso es también cierto, es decir, un cuerpo puede ser descargado. Si la placa 1 se aleja algo de la placa 2 y la llave interruptora es cerrada nuevamente como muestra la parte D de la figura 1-12, los electrones pueden retornar a la placa 2 desde tierra haciéndolo, de ese modo, neutro. Como ya se dijo, la *tierra* es siempre considerada un cuerpo neutro, porque su gran masa le permite absorber o entregar electrones sin evidenciar ningún cambio en su carga. De esta forma, el término "a tierra" o "puesto a tierra" usado con referencia a un cuerpo cargado, significa descargar ese cuerpo para que sea neutro con respecto a la tierra.

Descarga de cuerpos desde un punto

Las varillas y esferas usadas en las experiencias de electricidad estática, descritas anteriormente,

deben tener superficies uniformes. Los cuerpos con superficies irregulares y puntas o bordes afilados pierden sus cargas más rápidamente que los objetos que tienen superficies uniformes, debido a que la densidad de electrones es mayor en un punto. La parte A de la figura 1-13 muestra la distribución de electrones en un objeto irregular. Como las moléculas de aire alrededor del objeto cargado entran en contacto con él, absorben algunos de los electrones del cuerpo, adquiriendo carga, y siendo rechazadas. En la parte puntiaguda del cuerpo las moléculas de aire adquieren una carga mayor, y son repelidas con una fuerza mayor que causa al cuerpo la rápida pérdida de carga. Esta pérdida de electrones es llamada *"fuga"* o *"escape"*. La acción de descarga rápida provocada por las puntas se utiliza en las barras de pararrayos, los que se construyen con puntas muy agudas (parte B de la figura 1-13) que permiten la descarga de electrones entre la estructura protegida y la nube cargada.

1-5 RESUMEN DE ESTRUCTURA ATÓMICA Y DE LA ELECTROSTÁTICA

Antes de proseguir con otros aspectos de Física que están relacionados con la electrónica, será conveniente efectuar un breve resumen de los puntos más importantes del capítulo.

La teoría de la estructura atómica de la materia ha permitido establecer que una corriente eléctrica dentro de un material, consiste en un movimiento de electrones de átomo a átomo. La comprobación de que algunos materiales son mejores conductores de electricidad que otros, nos lleva a la clasificación general de materiales en conductores y aislantes.

Las cargas eléctricas hacen que todo material reaccione proporcionando las bases de las leyes de repulsión y atracción de cuerpos con cargas iguales o diferentes. La carga eléctrica de objetos puede efectuarse por tres métodos: contacto, con-

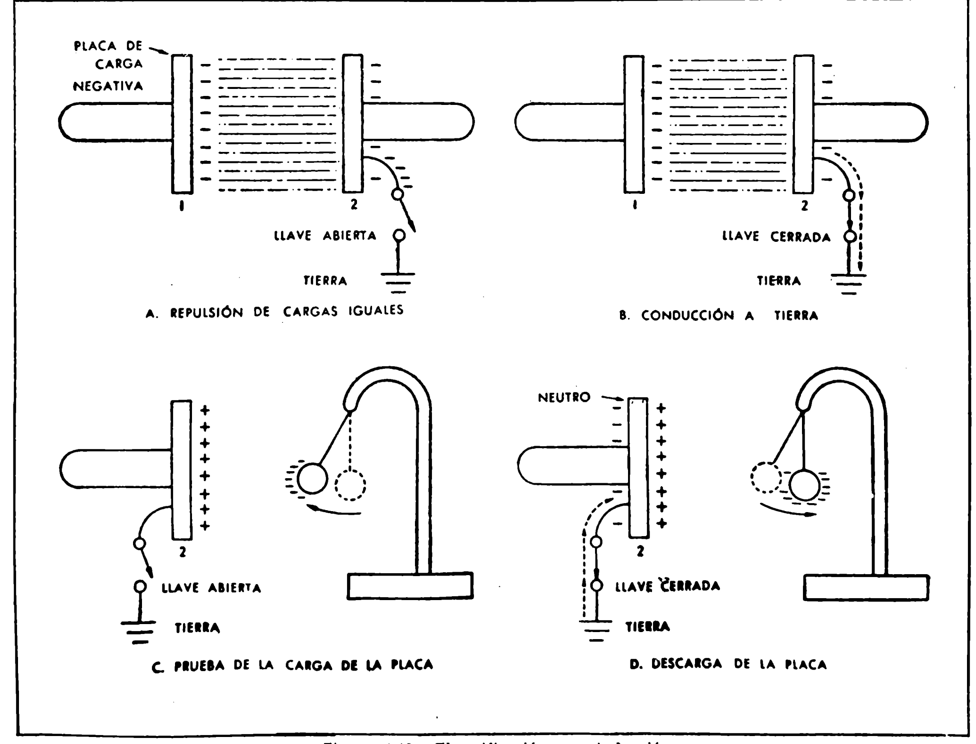


Figura 1-12. Electrificación por inducción

ducción e inducción. Los cuerpos pueden también descargarse estableciendo contacto con un cuerpo neutro, siendo la tierra el cuerpo neutro más grande. El Coulomb, unidad normal de carga eléctrica, que representa 6,28 billones de billones de electrones, se emplea como base para medir cantidades de electricidad.

1-6 MEDICIONES

Para satisfacer completamente cualquier experimento científico, o para comparar los resultados de un experimento con respecto a otros, deben medirse cuidadosamente los materiales o cantidades usados, antes y después de efectuado el experimento.

En el campo de la electrónica es necesaria la medición de cantidades tales como potencia, tensión, corriente, resistencia, capacidad, inductancia y algunas otras. A primera vista estas cantidades pueden parecer extrañas y sin relación con los sistemas de medida que nos son generalmente familiares en la vida diaria. Es conveniente rever, por lo tanto, las medidas normalizadas ("standard") existentes para mediciones de longitud, masa y tiempo a fin de establecer la necesidad de usar esas medidas y mostrar, también, que las medidas eléctricas normalizadas están en correlación con las medidas normalizadas más antiguas.

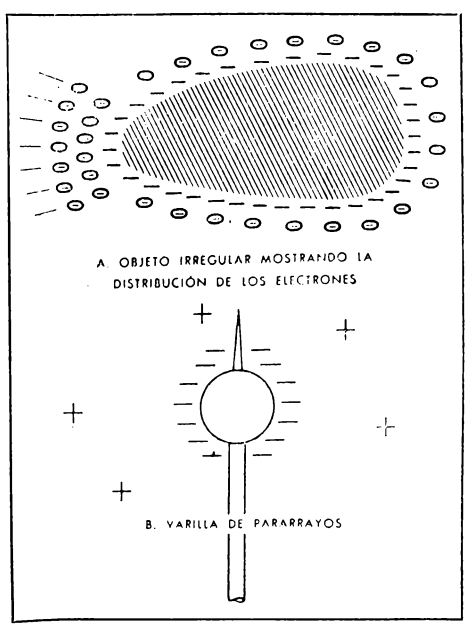


Figura 1-13. Objetos que pierden rápidamente una carga

Sistemas de medida

Las necesidades que llevaron a la unificación de sistemas de peso y medida y a la elección de patrones internacionales, tuvieron origen en el gran incremento del comercio mundial. Sin embargo, los avances científicos de una civilización creciente obligaron a obtener una precisión mucho mayor de las magnitudes fundamentales. En el presente, existen dos sistemas de medidas de uso común, el inglés y el métrico.

El *sistema inglés* data de antes de 1266, cuando se dictó una ley para uniformar pesos y medidas. En el sistema inglés, la *yarda* es la unidad normal de longitud, y la *libra* es la unidad normal de peso. Todas las otras unidades de longitud y peso son fracciones o múltiplos de la yarda o la libra. De ese modo, el *pie* es $1/3$ de la yarda; la *pulgada*, $1/36$ de la yarda; la *braza*, 2 yardas; la *vara*, 5½ yardas; la *milla terrestre* 5280 pies; la *milla náutica*, 6080 pies y así sucesivamente para todas las unidades comunes de longitud. La *onza* es igual a $1/16$ de la libra; la *tonelada corta*, 2000 libras; la *tonelada larga*, 2240 libras y así para todas las unidades comunes de peso. Dado que las mediciones en el sistema inglés son fracciones o múltiplos no igualmente relacionados, la conversión de una unidad a otra hace perder tiempo y es susceptible de errores.

En 1793, la Asamblea Nacional Francesa propuso un sistema de medidas ideado por una comisión cuyo propósito fue encontrar un sistema lógico de medidas. El resultado de la labor de la comisión fue el *sistema métrico decimal* utilizado actualmente, que se adoptó en Francia en 1799. Desde esa fecha la mayoría de las naciones europeas han adoptado el sistema métrico para uso comercial y científico. Los Estados Unidos utilizan el sistema métrico sólo para uso científico.

La unidad básica de longitud en el sistema métrico es el *metro*. El metro es la medida de la longitud de la diezmillonésima parte del cuarto de meridiano terrestre, o sea, prácticamente, la diezmillonésima parte de la distancia existente entre el Ecuador terrestre y cualquiera de los polos. Esta distancia convertida a la unidad inglesa es igual a 39,37 pulgadas. En la actualidad para fines de conversión, la yarda normal de Estados Unidos es definida en términos del metro.

La unidad básica de peso en el sistema métrico

es el *kilogramo*, que es igual al peso de 1 litro (medida de volumen) de agua pura a una temperatura de 4° centígrados. La unidad llamada *gramo*, o milésimo de kilogramo, se utiliza comúnmente como la medida fundamental de peso en el sistema métrico. El sistema métrico es un sistema decimal (un sistema divisible por 10) que simplifica la conversión de una unidad de longitud o peso a otra. Los prefijos griegos y latinos *deci-* (un décimo), *centi* (un centésimo), *mili* (un milésimo) y *micro* (un millonésimo) se utilizan para indicar fracciones (o submúltiplos) de la unidad básica. Ver en la tabla 1-1 las unidades métricas de longitud y peso.

Las unidades para la medición del tiempo son iguales en ambos sistemas, el Inglés y el Métrico. El *segundo* es la unidad base de tiempo que se emplea generalmente en trabajos de ingeniería y en la vida diaria.

TABLA 1-1. UNIDADES DE MEDIDA DEL SISTEMA MÉTRICO

1 KILÓMETRO	=	1000	METROS
1 CENTÍMETRO	=	0,01	METRO
1 MILÍMETRO	=	0,001	METRO
1 METRO	=	100	CENTÍMETROS
1 METRO	=	1000	MILÍMETROS
1 KILOGRAMO	=	1000	GRAMOS
1 CENTÍGRAMO	=	0,01	GRAMO
1 MILÍGRAMO	=	0,001	GRAMO

Medición de cantidades

En trabajos técnicos o científicos es necesario medir varios tipos de cantidades. Algunas de esas cantidades son: longitud, fuerza, masa, tiempo, velocidad, aceleración, fuerza, tensión y corriente. Consideremos las mediciones de velocidad y aceleración. La velocidad se mide generalmente en términos de millas o kilómetros por hora. De ese modo, la velocidad es una cantidad de longitud (distancia recorrida) dividida por una cantidad de tiempo (tiempo utilizado para recorrer esa distancia). La aceleración, que es la variación de velocidad por unidad de tiempo, se mide frecuentemente en pies por segundo. Por consiguiente, la aceleración se mide en términos de longitud dividida por tiempo al cuadrado. Tiempo al cuadrado, t^2, es una cantidad de tiempo multiplicada por sí misma. Los instrumentos que se utilizan comúnmente para medir longitud y tiempo nos son muy familiares. La longitud se mide con una regla o cinta métrica. Los tiempos se miden con un reloj o cronómetro.

Cuatro son las cantidades fundamentales asociadas a las ciencias físicas: fuerza, masa, longitud y tiempo. *Fuerza* es un empuje o tracción que actúa sobre un cuerpo. La fuerza toma diferentes formas, tales como el esfuerzo muscular requerido para empujar una caja apoyada sobre el suelo, o la fuerza ejercida por el agua en los costados y el fondo de un tanque de agua. En estos ejemplos, el cuerpo que ejerce la fuerza está en contacto con el cuerpo sobre el cual la fuerza es ejercida. Las fuerzas de este tipo son llamadas *"fuerzas de contacto"*. Hay también fuerzas que actúan sin contacto físico. La fuerza de gravedad, ejercida sobre un cuerpo por la tierra, y la fuerza electrostática son llamadas *"fuerzas de acción a distancia"*. Un ejemplo de medición de fuerzas es la medición del peso. Cuando se sostiene un objeto por una balanza a resorte, la balanza da una indicación del peso del objeto, o de cuánta fuerza se necesita para tener el objeto inmóvil contra la atracción de la gravedad terrestre.

Peso y masa son cantidades íntimamente relacionadas entre sí. Cualquier cosa que tiene peso y ocupa espacio tiene también masa. La masa es una cantidad de medida más importante que el peso. La masa de un objeto no puede cambiar; en cambio, el peso de un objeto depende de la atracción de la gravedad. Si el objeto fuera movido a un punto del espacio donde la gravedad terrestre es cero, el objeto podrá no tener peso pero tendrá la misma masa que tuvo en la superficie terrestre.

La relación entre la masa y el peso de un cuerpo puede deducirse partiendo del Principio de Masa de Newton [1] que dice:

Fuerza es el producto de la masa por la aceleración.

El Principio de Masa de Newton, expresado en términos matemáticos, es:

$$F = ma \qquad (1\text{-}2)$$

donde

F = cantidad de fuerza
m = masa
a = aceleración

El peso de un cuerpo sobre la tierra es la fuerza por la cual el cuerpo es atraído hacia el centro de la tierra. Con una ecuación similar a la anterior, el peso, en Kgs. de fuerza, puede expresarse como:

$$W = mg$$

donde

W = peso del objeto
m = masa del objeto
g = aceleración debida a la gravedad

[1] o segunda Ley del movimiento.

La aceleración debida a la gravedad, g, es el porcentaje de variación de cambio de la velocidad de un cuerpo que cae libremente hacia la superficie de la tierra. La aceleración debida a la gravedad ha sido calculada en 9,80 metros por segundo por segundo. Esto significa que cuando un cuerpo cerca de la superficie de la tierra cae libremente a través del espacio, su velocidad se incrementa en 9,80 metros por segundo durante cada segundo de tiempo de su caída. Si se transpone la ecuación

$$W = mg$$

para resolver m se dividen ambos términos por g, el resultado es:

$$m = \frac{W}{g} \quad (1\text{-}4)$$

De ese modo, la masa de un cuerpo es su peso en kilogramos de fuerza dividida por su aceleración debida a la gravedad. Redondeando el valor de g en 9,80 metros por segundo, si W es 1 kilogramo de fuerza, entonces m. es igual a 1/9,80 Kilogramos, de masa.

Las unidades de medición de fuerza en el sistema métrico y en el inglés son la dina y el poundal respectivamente. Un poundal es la fuerza requerida para impartir a una masa de una libra (32 slug) una aceleración igual a un pie por segundo por segundo. La dina es la fuerza requerida para imponer a una masa de un gramo una aceleración igual a un centímetro por segundo al cuadrado. Se necesitan 980 dinas de fuerza para igualar un gramo de peso.

Comparación de sistemas de medida

Los sistemas métrico e inglés de medidas tienen las tres cantidades fundamentales mencionadas previamente (longitud, masa y tiempo); el sistema inglés es denominado frecuentemente el sistema "fps", que significa pies-libra-segundo. Al sistema métrico se le denomina "cgs", que significa centímetro-gramo-segundo. La tabla 1-2 muestra una comparación de las unidades inglesas y métricas y otras cantidades que pueden derivarse de esas unidades básicas. En varios casos, puede ser necesario convertir medidas inglesas a unidades métricas o a la inversa. La tabla 1-3 presenta la relación entre algunas de las unidades más comunes de los sistemas inglés y métrico.

TABLA 1-2. COMPARACIÓN DE LOS SISTEMAS MÉTRICO E INGLÉS, INCLUYENDO LAS UNIDADES FUNDAMENTALES Y LAS DERIVADAS

Unidad	Inglés (fps)	Métrico (cgs)
CANTIDADES FUNDAMENTALES		
Longitud	Pie (ft)	Centímetro (cm)
Tiempo	Segundo (sec)	Segundo (sec)
UNIDADES DERIVADAS		
Superficie	Pie cuadrado (ft^2)	cm^2
Volumen	Pie cúbico (ft^3)	cm^3
Velocidad	Pie por segundo (ft/sec)	cm por segundo cm/s
Aceleración	Pie por segundo por segundo (ft/sec^2)	cm/s^2
Fuerza	Poundal	Dina

TABLA 1-3. EQUIVALENCIA DE LAS UNIDADES MÉTRICAS E INGLESAS MÁS COMUNES

1 m	= 39.37 pulg.	1 Km	= 0,6214 millas
1 m	= 3.28 pies	1 Kg	= 2,20 libras
1 pulgada	= 0,0254 m	1 libra	= 0,454 Kg
1 "	= 2.54 cm	1 gramo	= 1000 miligramos
1 pie	= 0.3048 m	1 "	= 0.03527 onza
1 "	= 30.48 cm	1 "	= 980 dinas (fuerza)
1 milla	= 1.609 Km	1 poundal	= 1.383×10^4 dinas (fuerza)
1 cm	= 0.3937 pulg	1 libra fuerza	= 4.448×10^5 dinas

Mediciones de temperatura

En la antigüedad no se tenían otros medios para medir la temperatura que la sensación del tacto. Galileo, el famoso científico italiano, fue el primer hombre que construyó un termómetro. Eligió el gas (aire) como un medio de expansión para obligar a un líquido (agua) a subir o bajar en un tubo indicando la temperatura. Este sistema fue inseguro por los efectos de la presión atmosférica, cuestión que no se conocía entonces. Tampoco podían realizarse mediciones por debajo de la temperatura de congelamiento del agua. Posteriormente a Galileo se desarrollaron termómetros perfeccionados y varios otros elementos sensibles al calor para lograr una mayor seguridad en las mediciones de temperatura.

Varios dispositivos electrónicos de uso corriente dependen directamente del calor o de los efectos del calor para su funcionamiento. Los efectos del

calor se usan en las válvulas electrónicas para proporcionar una fuente de electrones, así como se aplican al agua para obtener vapor. Ciertos componentes electrónicos se encierran en hornos de temperatura constante para prevenir los efectos de los cambios de temperatura.

Escalas de temperatura Centígrada y Fahrenheit

Sobre la escala de temperatura de un termómetro hay dos puntos de referencia muy importantes: la temperatura a la cual el hielo puro se funde y la temperatura a la cual el agua pura entra en ebullición. Estas temperaturas son llamadas punto de fusión y punto de ebullición respectivamente. Las graduaciones o grados, espaciados de un modo uniforme entre estos puntos, se usan para medir temperaturas desde el punto de fusión al punto de ebullición. Las temperaturas son medidas por más de un sistema de medidas.

Las dos escalas de temperatura más usadas son la escala Centígrada (C) y la escala Fahrenheit (F). Ver la figura 1-14.

En los Estados Unidos, la escala de temperatura más usada es la escala Fahrenheit, cuyo punto de fusión del hielo está a 32°F, y el punto de ebullición del agua está a 212°F. Entre esos dos puntos hay 180 grados. El punto de fusión de la escala centígrada está a 0°C y el punto de ebullición, a 100°C. De ese modo, la escala centígrada está dividida en 100 grados entre los dos puntos de referencia. Esto indica que un grado Fahrenheit es 100/180 ó $^5/_9$ de un grado centígrado. Las escalas C y F (figura 1-14) coinciden a —40°. La conversión de temperaturas Fahrenheit a la escala centígrada y viceversa es de mucha aplicación. La ecuación matemática dada más abajo proporciona un método seguro y fácil de conversión de una escala a otra. De la relación:

$$\frac{\text{Escala Centígrados}}{\text{Escala Fahrenheit}} = \frac{100 \text{ divisiones}}{180 \text{ divisiones}} = \frac{5}{9}$$

resulta:

$$F = \frac{9}{5} C° + 32° \qquad (1\text{-}5)$$

$$C° = \frac{5}{9} (F - 32°) \qquad (1\text{-}6)$$

donde

F = valor en grados Fahrenheit
C = valor en grados centígrados

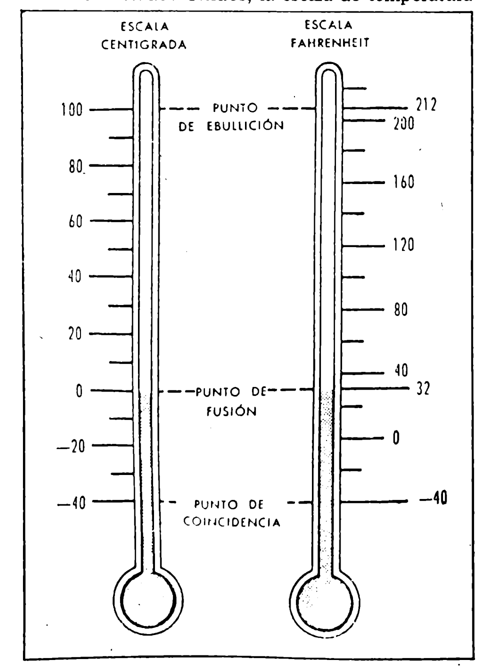


Figura 1-14. Relación entre escalas Fahrenheit y centígrada

1-7 TRABAJO, ENERGÍA, POTENCIA Y EFICIENCIA

Los términos *trabajo, energía* y *potencia* se confunden frecuentemente en la conversación diaria. Cuando se los usa en física y otras ciencias relacionadas con ésta, estos términos tienen un significado específico. Un ejemplo que demuestra la interrelación entre estos términos en electrónica, es el siguiente: la energía eléctrica se convierte en trabajo en los motores usados para impulsar las pesadas antenas de radar; la potencia consumida para hacer el trabajo debe ser conocida para poder suministrar la energía total requerida para ejecutar el trabajo con el máximo de eficiencia.

Trabajo

Corrientemente, la palabra trabajo indica alguna actividad mental o física. En física, se desarrolla trabajo sólo cuando una fuerza que actúa sobre un cuerpo físico mueve ese cuerpo a una distancia definida. La cantidad de trabajo ejecutado se mide por el producto de la fuerza que actúa sobre el cuerpo y la distancia a que se ha movido el cuerpo en la dirección de la fuerza. De ese modo, si una fuerza constante de 1 kilogramo obliga a un cuerpo a moverse 1 metro, el trabajo efectuado es de un kilogrametro. Una de las formas más simples de trabajo es levantar un peso.

La figura 1-15 muestra un peso de 10 kilogramos que ha sido levantado 5 metros en la dirección de la fuerza aplicada. En el movimiento de elevación, la dirección del movimiento es opuesta a la atracción de la gravedad. El trabajo ejecutado es el producto de la fuerza actuante sobre el cuerpo (10 kilogramos) por la distancia (5 metros) en que el cuerpo ha sido movido. Por consiguiente, el trabajo realizado es de 50 kilogrametros. El trabajo puede ser expresado en términos de una fórmula matemática:

$$T = F.d \qquad (1\text{-}7)$$

T = trabajo ejecutado en kilográmetros
F = fuerza aplicada en kilogramos
d = distancia en metros del movimiento del objeto.

En el sistema métrico de medidas se desarrolla una dina-centímetro de trabajo cuando una fuerza constante de una dina mueve un objeto a una distancia de un centímetro. La dina-centímetro, en la práctica, se reemplaza por su equivalente, el *erg*. Comparado con la libra-pie inglesa, el erg es una cantidad muy pequeña de trabajo, 0,7376 diez millonésima de libra-pie. Puesto que el erg es una unidad tan pequeña, se utiliza otra unidad métrica para expresar el trabajo, el joule. Un *joule* es igual a 10 millones de erg. Si se compara el joule con la libra-pie, un joule es igual a 0,7376 libra-pie.

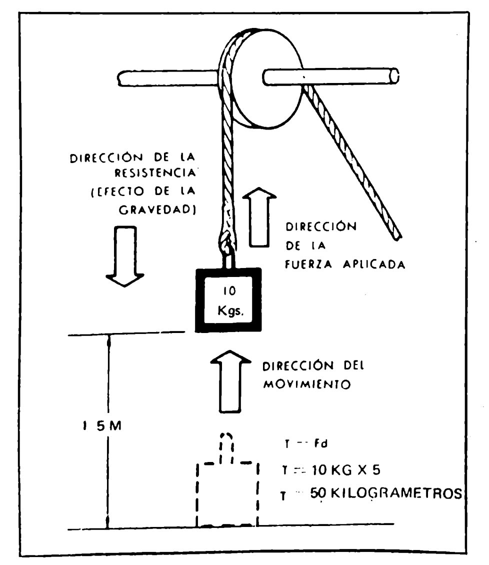


Figura 1-15. Trabajo realizado al levantar un peso

Si el peso de 10 kilogramos mostrado en la figura 1-15 se mantiene en la posición indicada, una persona que sostenga el peso podría estar ejerciendo una fuerza para retener el peso en ese punto, pero técnicamente no está realizando ningún trabajo, porque no tiene lugar ningún movimiento. Cuando se arrastra sobre el piso la caja de la figura 1-16, en la dirección de la fuerza aplicada, se ejecuta un trabajo para vencer la resistencia de fricción entre la caja y el piso.

Energía

La *energía* se define como la capacidad para hacer un trabajo. Esto significa que un objeto físico tiene energía si tiene capacidad para hacer un trabajo. En los párrafos precedentes se vio que el trabajo requerido para levantar 10 kilogramos de peso a 5 metros es de 50 kilogrametros. Ese peso tiene entonces capacidad para hacer 50 kilográmetros de trabajo por el retorno a su posición inicial. De ese modo, el peso en su posición elevada posee energía. Existen dos distintas clasificaciones de energía: energía potencial y energía cinética.

La *energía potencial* es la energía acumulada en un cuerpo o la energía que un cuerpo posee cuando está en reposo. Energía potencial es también la capacidad de un cuerpo para hacer un trabajo, debido a la posición del cuerpo con relación a otra posición llamada *nivel de referencia*. Si el mismo peso de 10 kilogramos se levanta a 5 metros desde el suelo y se coloca sobre una plataforma, el peso tiene la capacidad para hacer 50 kilogrametros de trabajo con relación al suelo, pero en relación a la plataforma su capacidad para hacer un trabajo es cero.

La energía potencial de un cuerpo es igual al peso del cuerpo por la distancia a la que es elevado sobre el nivel de referencia. Para calcular la energía potencial de un cuerpo en unidades inglesas se utiliza la ecuación:

$$P.E = wh \qquad (1\text{-}8)$$

donde

P.E. = energía potencial en kilográmetros
w = peso del cuerpo en kilogramos
h = altura del cuerpo sobre el nivel de referencia, en metros.

Para calcular la energía potencial de un cuerpo en unidades métricas, se usa la ecuación:

$$P.E = mgh \qquad (1\text{-}9)$$

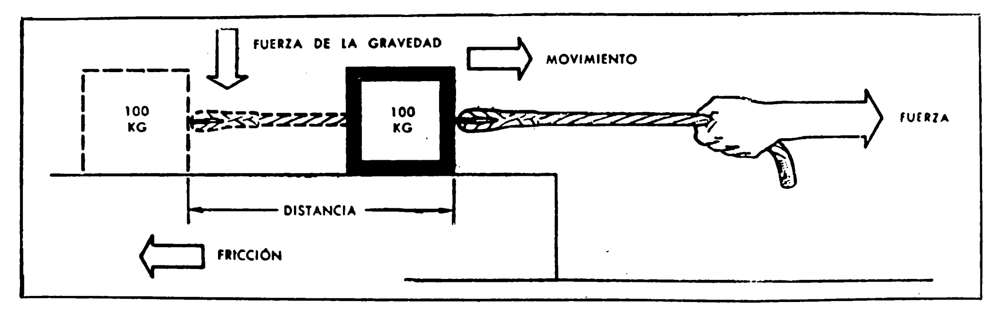


Figura 1-16. Trabajo realizado para vencer a la fricción

donde

P.E = energía potencial en erg
m = masa del cuerpo en gramos
g = aceleración debida a la gravedad en centímetros por segundo al cuadrado
h = altura del cuerpo sobre el nivel de referencia en cm

Comparando la ecuación para la energía potencial (P.E = mgh) con la ecuación para el trabajo (T = Fd) parecería que el trabajo ejecutado al levantar un cuerpo iguala a la energía potencial del cuerpo cuando es levantado. Estas ecuaciones muestran que la energía puede ser transformada en trabajo y que el trabajo puede transformarse en energía. La nafta, el carbón de piedra, el petróleo, la pólvora en una cápsula, la carga de una batería eléctrica y un peso levantado, son todos ejemplos de cosas que poseen energía potencial.

La *energía cinética* es energía debida al movimiento; siempre que un objeto físico está en movimiento, es capaz de hacer un trabajo para volver al reposo. Por ejemplo, supongamos el peso de un martinete elevado hasta una altura dada sobre el pilar. En esta posición el peso tiene energía potencial. Mientras el peso cae, su energía potencial se transforma en energía cinética. A mayor distancia de caída, mayor es su velocidad y mayor la cantidad de energía potencial que ha sido transformada en energía cinética.

Conservación de la energía

La transformación de energía en cualquier caso, implica la ejecución de un trabajo. En el uso común, la energía potencial y la cinética son agrupadas generalmente con la denominación de energía mecánica, porque están estrechamente relacionadas al aspecto mecánico de un cuerpo en reposo o en movimiento. Sin embargo, cualquier forma de energía —sea clasificada como mecánica, química, eléctrica, calórica o luminosa— tiene el potencial para hacer algún tipo de trabajo. La energía se transforma desde su forma original en una o varias de las otras formas en el proceso de ejecución de ese trabajo. Por ejemplo, cuando el petróleo se quema, energía calórica que produce puede convertirse en energía mecánica impulsando una turbina a vapor. Un generador conectado a la turbina transforma la energía mecánica en energía eléctrica. La energía eléctrica puede luego convertirse en energía calórica para cocinar o para el calentamiento de los cátodos de las válvulas de un receptor de radio. La energía acumulada en varias sustancias y capaz de ser liberada por una reacción química, puede convertirse en energía eléctrica; este cambio lo realiza en una batería de acumuladores. Gracias a los conocimientos que sobre la materia ha adquirido el hombre, pueden efectuarse muchos otros cambios en las formas de la energía. Toda la energía de la tierra se origina en el sol. La energía del sol se acumula en la tierra en varias formas, tales como potencia hidráulica, potencia eólica, o en la vegetación, como combustible. Las diversas transformaciones de la energía citadas anteriormente atrajeron la atención de los primeros físicos y químicos, y los impulsaron a explorar las transformaciones y a descubrir la *Ley de Conservación de la Energía.*

En la naturaleza nada se crea y nada se pierde, todo se transforma.

Potencia

Del estudio del trabajo y la energía se deduce que el tiempo requerido para ejecutar una tarea no es un factor en el cómputo de la cantidad de trabajo realizado. Consideremos el ejemplo de dos personas, cada una de las cuales sube una esca-

lera llevando un cubo; una de ellas ejecuta este trabajo dos veces más rápidamente que la otra. Aunque las dos personas hacen exactamente la misma cantidad de trabajo, la relación con respecto al tiempo es diferente. Esta relación en la ejecución del trabajo y el tiempo se conoce como *potencia*. Si una cantidad determinada de trabajo se ejecuta en un cierto intervalo de tiempo, la potencia es igual a la cantidad de trabajo ejecutado dividido por el intervalo de tiempo. Expresada en forma de ecuación:

$$P = \frac{T}{t} \qquad (1\text{-}10)$$

donde

P = potencia, en kilográmetros por segundo
T = trabajo en kilográmetros
t = tiempo, en segundos

En el sistema métrico el trabajo, en la fórmula anterior, se expresa en erg y la potencia está dada en erg por segundo.

Para simplificar los cálculos, los científicos idearon una unidad mayor que la libra-pie por segundo o el erg por segundo. James Watt, un científico inglés, observó que la potencia neta constante que un caballo puede mantener por un tiempo razonable es de 550 libra-pies por segundo. Watt llamó a esta cantidad de potencia un *caballo de fuerza*. Durante años, el uso ha hecho del caballo de fuerza la unidad normal para la medición de la potencia.

Los términos *potencia de entrada* y *potencia neta* o *útil* son de uso común en el campo de la electricidad y la electrónica. Aunque las unidades de potencia eléctrica no son iguales a las de potencia mecánica, el concepto básico es el mismo. Puede convertirse rápidamente de un sistema de unidades a otro. La unidad eléctrica de potencia es el *watt*, llamado así en honor a James Watt. El watt representa la proporción de transformación de la energía en un circuito eléctrico. El watt es la unidad básica de potencia en el sistema inglés para aplicaciones eléctricas y electrónicas. El watt puede convertirse en unidades mecánicas mediante el uso de la relación:

1 caballo de fuerza = 746 watt

La unidad de potencia eléctrica en el sistema métrico es el *joule*. El término joule ha sido ya definido como la unidad de trabajo en el sistema métrico. También en usos eléctricos, el término *joule* es el que indica potencia.

La potencia útil de máquinas de vapor, máquinas de gas y otros artefactos mecánicos, se calcula generalmente en caballos de fuerza. Los artefactos eléctricos son calculados en watt o kilowatt (1000 watt). La potencia de entrada de un motor eléctrico se expresa normalmente en watt o kilowatt, y la *potencia útil* obtenida se expresa en caballos de fuerza. La tabla 1-4 muestra la relación entre las diferentes unidades de potencia.

TABLA 1-4. RELACIÓN ENTRE UNIDADES DE POTENCIA

1 caballo vapor (HP)	= 550 kilogrametros por segundo (ft-lb/sec)
	= 33.000 kilogrametros por minuto (ft-lb/min.)
	= 746 watt
	= 0.746 kilowatt
1 watt	= 0.737 kilográmetros por segundo (ft-lb/sec)
1 kilowatt	= 737 kilográmetros por segundo (ft-lb/sec)
1 joule	= 0.738 kilográmetros por segundo (ft-lb/sec)

Rendimiento

La potencia útil de cualquier máquina mecánica, mecanismo, motor eléctrico o circuito eléctrico es siempre menor que la potencia de entrada. La diferencia entre la potencia de entrada y la potencia útil es la pérdida de *potencia*. En artefactos mecánicos, la pérdida de potencia es causada por la fricción; en circuitos eléctricos, la pérdida de potencia es causada por la resistencia a la corriente de electrones. En ambos casos, la pérdida de potencia resulta en una generación de calor.

El rendimiento es definido como la relación entre potencia útil y potencia de entrada. Expresado matemáticamente:

$$\text{rendimiento} = \frac{\text{potencia útil}}{\text{potencia de entrada}} \times 100 \qquad (1\text{-}11)$$

El rendimiento se expresa como un porcentaje y es siempre menor que el 100 por ciento, porque parte de la potencia suministrada a cualquier máquina se gasta en forma de pérdida de potencia. La relación entre potencia de entrada, pérdida de potencia y potencia útil está expresada como:

Potencia útil = potencia de entrada — pérdida de potencia

Potencia de entrada = potencia útil + pérdida de potencia

Pérdida de potencia = potencia de entrada — potencia útil.

El rendimiento puede expresarse en términos de trabajo, como sigue:

$$\text{rendimiento} = \frac{\text{trabajo útil}}{\text{trabajo de entrada}} \times 100 \qquad (1\text{-}12)$$

En esta ecuación el trabajo útil representa el trabajo real cumplido; el trabajo de entrada representa el total del trabajo cumplido incluido el trabajo útil y el perdido para vencer la fricción. Las relaciones entre trabajo de entrada, pérdida de trabajo y trabajo útil son similares a aquéllas entre potencia de entrada, pérdida de potencia y potencia útil. Estas relaciones son:

Trabajo útil = trabajo de entrada — pérdida de trabajo

Trabajo de entrada = trabajo útil + pérdida de trabajo

Pérdida de trabajo = trabajo de entrada — trabajo útil.

El ejemplo siguiente ilustra el uso de algunas de estas ecuaciones. Se necesita una fuerza de 50 kilogramos para subir un canasto de 200 kilogramos por una rampa de 4 metros de altura y 25 metros de largo. ¿Cuál es el rendimiento de la rampa?

El trabajo de entrada o el trabajo total ejecutado para empujar el canasto sobre la rampa se calcula de la siguiente forma:

$$T = Fd$$
$$= 50 \text{ Kg} \times 25 \text{ metros}$$
$$T = 1250 \text{ kilográmetros}$$

El trabajo neto o útil es exactamente igual al trabajo hecho para levantar dicho canasto verticalmente hasta una altura de 4 metros. Este trabajo se calcula como sigue:

$$T = Fd$$
$$= 200 \text{ kg.} \times 4 \text{ metros}$$
$$T = 800 \text{ kilográmetros}$$

$$\text{rendimiento} = \frac{\text{trabajo de salida}}{\text{trabajo de entrada}} \times 100$$

$$= \frac{800}{1250} \times 100$$

$$\text{rendimiento} = 64\ \%$$

En el ejemplo dado, la pérdida de trabajo es:

pérdida de trabajo = trabajo de entrada — trabajo neto
= 1250 kilográmetros - 800 kilográmetros
= 450 kilográmetros

El rendimiento de las máquinas y de los artefactos puede variar en gran escala, dependiendo de la construcción y características de trabajo de las mismas. Ninguna máquina es perfecta. Una maquinaria a nafta puede tener un rendimiento del orden del 25 % mientras que un motor eléctrico puede tener un rendimiento tan elevado como el 75 %.

1-8 RESUMEN

Física es la ciencia básica que trata del movimiento, la fuerza y la energía y, por consiguiente, involucra las leyes de mecánica, electricidad, magnetismo, sonido, calor y luz. Se ha mostrado que toda materia está compuesta fundamentalmente de partículas con carga eléctrica. Algunos materiales, tales como el cobre, la plata y el aluminio, permiten el libre intercambio de electrones entre átomo y átomo cuando se les aplica una fuerza suficiente. Estos materiales son denominados conductores. Otros materiales, tales como la porcelana, el vidrio y la goma, no permiten el libre intercambio de electrones de átomo a átomo. Estos materiales se llaman aislantes. Los conductores y aislantes se usan en los equipos eléctricos para proporcionar los caminos y barreras necesarios para controlar la corriente eléctrica.

Los experimentos demuestran que los cuerpos cargados son simples sustancias o partículas que tienen un exceso o deficiencia de electrones. Los experimentos también muestran que dos cuerpos cargados ejercen una fuerza uno sobre otro.

Mediante el uso de un sistema normalizado de pesas y medidas pueden obtenerse cantidades exactas de cada sustancia para proporcionar un producto uniforme. Además, se pueden derivar conclusiones exactas de los experimentos si se registran y calculan con precisión las cantidades de materiales y fuerza usados.

De la información presentada resulta que trabajo, energía, potencia y rendimiento son cantidades íntimamente relacionadas.

CUESTIONARIO

1. Nombre varias formas de energía en las cuales puede transformarse la energía eléctrica.
2. ¿Cuáles son las tres clases de materia?
3. ¿Cuál es la partícula más pequeña a que puede reducirse un elemento conservando sus características originales?
4. Nombre las partes de un átomo.
5. En electrónica, ¿cuál es la partícula más importante del átomo?
6. ¿Qué es una corriente eléctrica?
7. ¿Qué es un conductor?
8. ¿Qué es un aislante?
9. Exprese las leyes de la atracción y repulsión de los cuerpos cargados.
10. ¿Qué es una línea de fuerza electrostática?
11. Exprese la Ley de Fuerza de Coulomb.
12. ¿Cuáles son los tres medios para cargar eléctricamente un cuerpo neutro?
13. ¿Qué es el rayo?
14. ¿Cuáles son los dos sistemas de medidas más usados?
15. ¿Cuál es la unidad normal de tiempo en ambos sistemas?
16. Exprese la segunda Ley del movimiento de Newton.
17. ¿Cuáles son los dos puntos de referencia importantes sobre la escala de un termómetro?
18. En física, ¿cuándo se dice que se realiza un trabajo?
19. ¿Cuáles son las unidades de trabajo en los dos sistemas de medida?
20. ¿Qué es energía?
21. ¿Cuál es la diferencia entre energía potencial y energía cinética?
22. Exprese la ley de la conservación de la energía.
23. ¿Qué es potencia?
24. ¿A cuántos watt eléctricos es igual un caballo de fuerza?
25. ¿Qué es rendimiento y cómo se lo expresa?

CAPITULO II

Unidades Eléctricas Fundamentales

2-1 Introducción

Tres magnitudes invisibles fundamentales —tensión, corriente y resistencia— están presentes en todo circuito eléctrico. Estas magnitudes, controladas y dirigidas por un sistema apropiado de partes componentes, producen el funcionamiento satisfactorio del equipo. Para identificar cada uno de los componentes, se utilizan términos y símbolos específicos con los que se logra un rápido reconocimiento y comprensión de su uso. Las magnitudes eléctricas básicas, los términos, nombres de los componentes, y sus correspondientes unidades de medida forman, en parte, el "idioma de la electrónica".

2-2 POLARIDAD

El estudio de la electricidad estática llevó a la conclusión que dos cuerpos con distintas cargas proveen la fuerza requerida para producir el movimiento de electrones en un conductor que una esos dos cuerpos. Si conocemos de antemano cuál de esos dos cuerpos lleva carga positiva o negativa, respectivamente, es posible predecir la dirección del flujo de electrones. Esta cualidad direccional es conocida como *Polaridad*.

Cuando existe una diferencia de carga eléctrica entre dos puntos, se dice que uno de ellos tiene polaridad positiva o negativa *con respecto al otro*. Muchos artefactos productores de energía eléctrica tienen sus terminales marcados con un signo (+) o (—) para indicar la polaridad en los terminales respectivos. Es fundamental conocer la polaridad al hacer las conexiones para el correcto funcionamiento del equipo.

Antes de que la composición de la materia fuera aclarada por la teoría atómica se creía que la corriente eléctrica era un desplazamiento de cargas positivas desde un punto cargado positivamente, hasta un punto de polaridad negativa.

En electrónica, se sabe ahora que es un movimiento de electrones desde un punto de polaridad negativa hasta un punto de polaridad positiva.

En algunos textos de ingeniería eléctrica y de física, la corriente eléctrica todavía se considera como desplazándose desde el positivo hacia el negativo, y muchos conceptos se basan en este principio. En este texto se usa la concepción moderna de corriente eléctrica del principio al fin, considerando la dirección del flujo desde el terminal negativo de una fuente de energía, a través del circuito eléctrico, hacia el terminal positivo de la fuente.

NOTA

El término *corriente eléctrica* usado arriba, es gramaticalmente erróneo. La corriente eléctrica no fluye, *es* un flujo (de electrones). Sin embargo, como es un término de uso corriente en el campo de la electrónica, también es utilizado en este libro.

2-3 EL VOLT

La diferencia de carga eléctrica entre dos puntos o dos objetos posee la facultad de producir trabajo, originando un movimiento de electrones a través de un conductor conectado entre ambos puntos. La energía potencial que existe entre cuerpos que tienen distintas cargas se denomina comúnmente diferencia de potencial, o simplemente, potencial entre dos puntos.

El potencial eléctrico puede ser tanto positivo como negativo con respecto a un cuerpo considerado neutro; (la tierra).

Si el flujo de electrones va hacia tierra desde un cuerpo cargado, el cuerpo tiene potencial negativo; si en cambio el flujo va desde tierra hacia el cuerpo, tiene potencial positivo.

Las magnitudes de carga eléctrica se expresan en términos de unidades electrostáticas (u.e.s.) o coulomb. En las aplicaciones prácticas la unidad de medida de potencial eléctrico es el volt. Se dice que entre dos puntos existe una diferencia de potencial de un volt cuando, al circular un coulomb entre esos dos puntos, produce un trabajo de un joule.

$$1 \text{ volt} = \frac{1 \text{ joule}}{1 \text{ coulomb}}$$

De esta relación se deduce que si el sistema de alumbrado de una casa tiene un circuito de 110 volt, se desarrollarán 110 joule de energía eléctrica dentro de la casa, cuando 1 coulomb de electrones entra por un conductor y sale por el otro.

Diferencia de potencial, carga eléctrica y volt, son modos de expresar la fuerza producida entre cuerpos cargados eléctricamente. Esta fuerza puede llamarse también *fuerza electromotriz* (f.e.m.) o *tensión*. Hay muchos métodos para producir tensión. Algunos de estos métodos son: fricción, energía calorífica, energía luminosa, energía química y energía mecánica. La energía química y mecánica se utilizan como principales medios de producir energía eléctrica en forma constante (f.e.m.) para mantener un flujo continuo de electrones para el funcionamiento de aparatos eléctricos. Una pila produce una diferencia de potencial entre sus terminales, transformando energía química en energía eléctrica. Un generador realiza el mismo trabajo transformando la energía mecánica en eléctrica. La teoría de estos aparatos será explicada más adelante; por ahora, las pilas y los generadores serán considerados como fuentes capaces de producir una diferencia de potencial constante.

2-4 EL AMPERE

Se define una corriente eléctrica como un flujo de electrones a través de un material o medio, desde un punto de potencial negativo hacia un punto de potencial positivo.

La cantidad de flujo de electrones se mide en ampere.

Se dice que la intensidad de flujo de corriente en un conductor es de un ampere, cuando por un punto del conductor, fluye un coulomb por segundo (1 coulomb = 6,28 × 10^{18} electrones).

Expresando la intensidad de flujo en una fórmula:

$$I = \frac{Q}{T} \qquad (2\text{-}1)$$

donde

I = corriente en ampere
Q = cantidad de carga eléctrica
T = tiempo en segundos

Para tener un concepto de cantidad de flujo de corriente, es aconsejable interpretar el significado de densidad de corriente y de velocidad de movimiento de la corriente. En condiciones normales los electrones libres en un conductor no fluyen en ninguna dirección especial; esta actividad de los electrones es una acción casual, desordenada, donde los electrones son liberados por efecto de la temperatura ambiente, y simplemente saltan de átomo en átomo, sin rumbo determinado. Sin embargo, cuando un conductor esta conectado a los terminales de una fuente de tensión, esta fuerza producirá un movimiento de electrones libres, desde el terminal negativo de la fuente hasta el terminal positivo. La figura 2-1 ilustra el movimiento de los electrones a través de un conductor cuando está conectado a los bornes de una batería. La línea AB representa una sección transversal del conductor. Cuando es aplicada la f.e.m. de la batería, los electrones se mueven a través del conductor y en esas condiciones cruzan la línea AB. Si un coulomb de carga pasa por la línea AB en un segundo, por ella fluye un ampere de corriente. Si se traza una segunda línea entre los puntos C y D donde el área de la sección del conductor es reducida, se verá que 1 coulomb de carga pasa también esa línea en un segundo. Sin embargo, a causa de la disminución de la sección del conductor en la línea CD, la *densidad de corriente* en esta línea (la corriente a través de una sección transversal dividida por el área de esa sección) es mayor que en la línea AB, con la misma corriente en ambas líneas.

El movimiento neto de los electrones es el resultado del movimiento al azar más el movimiento producido pro al f.e.m. aplicada. Como resultado, todos los electrones son simultáneamente guiados dentro del conductor, por la acción sostenida de la tensión aplicada. Estos podrían ganar velocidad bajo la acción de la f.e.m., pero el efecto de las colisiones entre ellos contrarresta constantemente el incremento de velocidad. Se ha

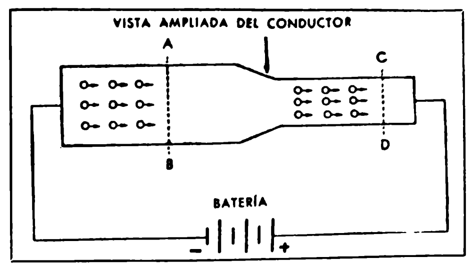


Figura 2-1. Movimiento de los electrones a través de un conductor

determinado que la *velocidad de desplazamiento* de la corriente de electrones correspondiente al ampere alcanza aproximadamente 1 cm por segundo, según las dimensiones del conductor, el material y otros factores.

La velocidad de desplazamiento relativamente baja de los electrones plantea una cuestión importante. ¿Como puede la energía eléctrica suministrada en una planta generadora llegar a los usuarios situados a muchos kilómetros de distancia casi instantáneamente? Para dar una respuesta lógica a esta pregunta, veamos el circuito de la figura 2-2. Tan pronto como se cierra la llave del circuito, aparece una f.e.m. (diferencia de potencial entre ambos extremos del punto conductor). El terminal positivo de la batería atrae electrones del punto A, dejándolo con déficit de electrones. Entonces el punto A atrae electrones del punto B, y este mismo efecto se repite a lo largo del conductor, C a D y E a F Casi en el mismo instante en que el terminal positivo de la batería atrajo un electrón del punto A, el terminal negativo de la batería suministró un electrón al punto F. De esta manera, pese a que los electrones se mueven con una velocidad muy pequeña, el efecto de los cambios de posiciones de los electrones se propaga a lo largo del conductor casi instantánea-

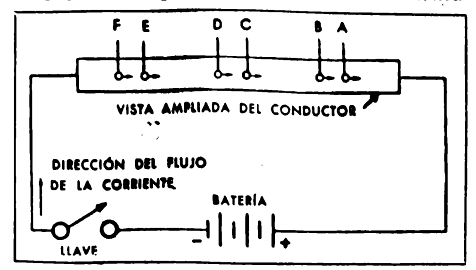


Figura 2-2. Movimiento resultante de electrones a través de un conductor

mente. La velocidad de propagación es aproximadamente la de la luz (300.000 km. por segundo).

2-5 EL OHM

Se ha observado mediante la experimentación que valores idénticos de tensión (f.e.m.) aplicados a muestras de materiales distintos, pero de idénticas dimensiones, producen corrientes distintas a través de cada uno de ellos. Además, aplicando valores idénticos de tensión a muestras de distintas dimensiones, pero de un mismo material, se obtienen corrientes distintas para cada muestra. De estos hechos experimentales, Georg Simon Ohm, físico alemán, dedujo que para una tensión fija, la cantidad de corriente que circula depende del tipo de material y de sus dimensiones. *Ohm* es el término que se aplica a la unidad de *resistencia eléctrica* que ofrecen los diversos materiales a una corriente eléctrica. Se dice que un material tiene una resistencia de un ohm si al aplicar una tensión de 1 volt circula por el material una corriente de 1 ampere. El uso del ohm puede ser aplicado en términos generales tanto a conductores como a aisladores. Un aislador tiene un valor óhmico (resistencia eléctrica) muchas veces mayor que el de un condctor.

2-6 CLASIFICACIÓN DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA

La corriente eléctrica se clasifica en dos tipos generales: corriente continua y alternada. Ambas corrientes comparten su importancia en casi todas las clases de artefactos eléctricos y electrónicos. Un receptor de radio es, en general, un ejemplo de aparato que usa ambos tipos de corriente: la alternada suministra energía general a la radio, y la continua hace funcionar los componentes electrónicos de la misma.

Corriente continua (C.C.)

La corriente eléctrica ha sido descrita como el "flujo direccional de los electrones". La dirección de este flujo está determinada por la polaridad de la fuente de tensión. En el caso de la batería, aprendimos que la polaridad de las terminales es fija, y de ello resulta que la corriente eléctrica fluye en una sola dirección cuando la batería está conectada a un aparato eléctrico. Este tipo de corriente que fluye en una dirección, se denomina *corriente continua* (C.C.). La fuente de tensión que produce una corriente continua es comúnmente llamada una "fuente de alimentación de C.C.".

Corriente alternada (C.A.)

La acción de una corriente alternada puede comprenderse fácilmente si se considera la acción del péndulo de un reloj. El péndulo oscila primero en una dirección hasta cierta altura, luego vuelve por el mismo camino en dirección opuesta hasta una altura equivalente.

Este movimiento del péndulo oscilando alternativamente, primero en una dirección y luego en la opuesta, es muy similar al movimiento de la corriente alternada, que fluye primero en una dirección y luego vuelve a fluir en dirección opuesta. Estos cambios de dirección del flujo no significan que la corriente alternada desobedezca la regla de que los electrones fluyen de un potencial negativo a un potencial positivo, sino que en realidad esto significa que la tensión aplicada es también alternativa en polaridad. Esta acción se repite mientras continúe aplicada en un circuito una fuente de tensión alternativa (de polaridad cambiante). La corriente no sube y cae instantáneamente, sino que crece y decrece según el gráfico 2-3.

Se llama frecuencia de la corriente alternada al número de veces que cambia la polaridad de la corriente por segundo. La frecuencia de la red domiciliaria es de 60 ciclos por segundo (un ciclo es el tiempo requerido por la corriente para completar el flujo en ambas direcciones). Las frecuencias comprendidas entre 20 ciclos/seg y 20.000 ciclos/seg se llaman *audiofrecuencias;* pueden ser oídas por el oído humano si se aplican a aparatos adecuados. Las frecuencias superiores a 20.000 ciclos/seg se denominan radiofrecuencias, y no pueden oírse. Los fundamentos de la corriente alternada se describen en detalle en otra parte del texto. Por ahora es suficiente recordar que la corriente continua fluye en una sola dirección, y que la corriente alternada fluye primero en una dirección y luego en la opuesta.

2-7 COMPONENTES ELECTRÓNICOS Y TÉRMINOS ASOCIADOS

Los diversos componentes usados en los equipos electrónicos se basan en distintos principios de funcionamiento. Estos componentes están divididos fundamentalmente en cuatro categorías: resistores, capacitores, inductores o bobinas y transformadores y pueden obtenerse en varias formas y tamaños para cumplir distintas funciones en el equipo.

Resistores

El resistor es el elemento diseñado para ejercer oposición al paso de la corriente. La intensidad de oposición al flujo de corriente es la misma para ambas corrientes, alternada y continua. Los resistores pueden dividirse en tres grandes gru-

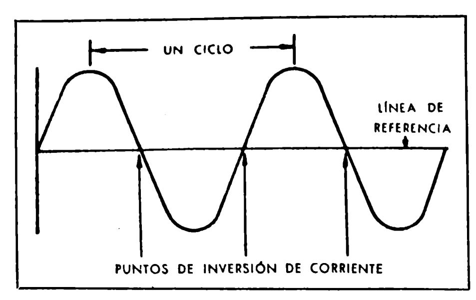


Figura 2-3. Representación gráfica de una corriente alternada

pos, de acuerdo con su construcción: resistores fijos, regulables o ajustables y variables.

Resistores fijos: se usan para introducir un valor constante de resistencia en un circuito. Su tamaño y construcción están determinados por la cantidad de corriente que las debe atravesar. Para bajas intensidades de corriente usan resistores pequeños de carbón o metalizados. Donde se debe trabajar con mayores intensidades se usan resistores mayores de alambre arrollado. La figura 2-4 A muestra ejemplos de resistores fijos. Para identificarlas en un gráfico, se emplea el símbolo utilizado en la figura 2-4 B. Los resistores fijos están provistos frecuentemente de marcas de colores para indicar su valor de resistencia y su tolerancia. Este sistema de marcación se llama *código de colores para resistores.* Los resistores más grandes, usados para altas intensidades, están revestidos frecuentemente con una película dura de esmalte vítreo. El código de colores no se usa para éstos, pero su valor en ohm está impreso generalmente en alguna parte de la pieza. La figura 2-4 C muestra el símbolo usado para los resistores fijos con derivación, similar al usado en resistores fijos para intensidades elevadas. Los resistores fijos se construyen de tal forma que la posición de las derivaciones no puede ser cambiada.

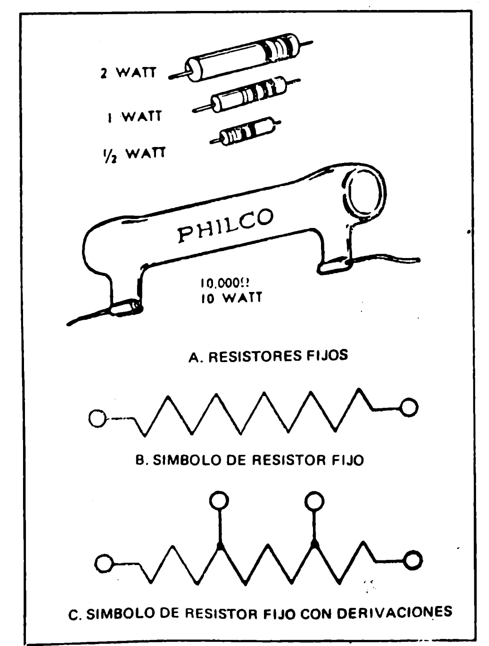


Figura 2-4. Resistores fijos y sus símbolos

Resistores regulables: se usan cuando es necesario ajustar el valor de la resistencia inicialmente o variarlo de vez en cuando. En su forma más común el resistor regulable es de alambre arrollado y tiene uno o más anillos deslizables que se corren sobre ella para obtener el valor de resistencia que se desee. La figura 2-5 muestra uno de los tipos de resistor regulable, junto con su símbolo representativo.

Resistores variables: se usan cuando deben cambiarse con frecuencia los valores de resistencia. Según los requisitos de la corriente, son de carbón o de alambre. El verdadero elemento resistivo de el resistor variable es generalmente de forma circular. La pieza deslizable de contacto con el elemento resistivo está provista de un eje

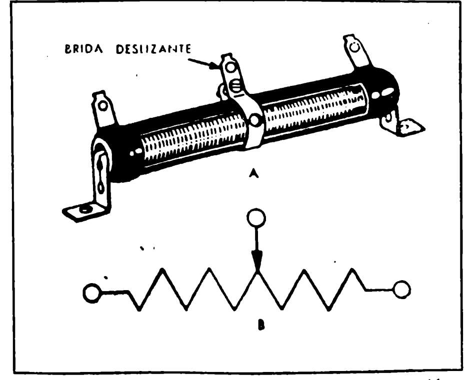


Figura 2-5. Resistor ajustable y su representación simbólica. (Se usa el mismo símbolo para representar el potenciómetro)

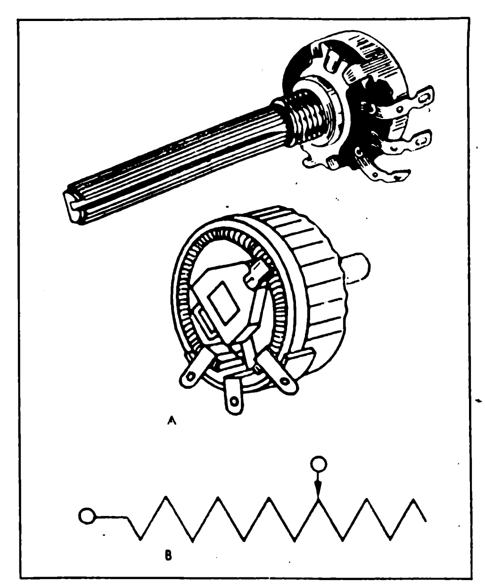


Figura 2-6. Resistor variable y representación simbólica del reóstato.

y una perilla, por medio de los cuales se cambia con suavidad el valor de resistencia. La sección A de la figura 2-6 muestra ambas clases de resistores: el de carbón y el de alambre. Hay dos términos que están asociados con los resistores variables: *reóstato* y *potenciómetro.*

Si sólo están conectados un extremo de la resistencia y de la pieza de contacto deslizable, este resistor variable se llamaría reóstato y se simboliza como lo muestra la figura 2-6 B. Si están conectados ambos extremos y la pieza de contacto, se llama potenciómetro y se simboliza igual que el resistor regulable de la figura 2-5 B.

Inductores

Un inductor es otro componente que tiene la propiedad de oponerse al paso de corriente, pero en forma distinta a la resistencia, pues no se opone igualmente a la corriente continua y a la alterna. El inductor sólo ofrece resistencia a los *cambios de intensidad,* mientras que la resistencia se opone *a todo flujo de corriente.* De este modo, un inductor ofrece resistencia al paso de la corriente alterna, pero casi no tiene efecto con la continua. Esta propiedad de un inductor de oponerse sólo al paso de la corriente alterna se llama *inductancia* y se mide en unidades *henry.* Un inductor puede tomar cualquier forma o tamaño pero básicamente no es más que una bobina o arrollamiento de alambre. Hay 3 tipos de inductores: fijos, regulables y variables.

Inductores fijos: proveen un valor de inductancia constante. La mayoría de las bobinas que se usan en los equipos electrónicos son fijas. Los inductores fijos o bobinas se utilizan en el circuito de sintonía de radiorreceptores y transmisores. En la figura 2-7 A puede verse una bobina típica para transmisores que consiste en un solo arrollamiento de alambre grueso. El símbolo usado para este tipo de inductor se ve en la figura 2-7 B. Otro de los tipos usuales de esta clase de aparatos es una bobina devanada sobre un núcleo de hierro, y se denomina "inductor de núcleo de hierro".

En la figura 2-8 A puede verse un ejemplo de este tipo y su símbolo está indicado en la figura 2-8 B.

Inductores regulables: del tipo utilizado en los modernos equipos de radio, son de dos modelos principales; el primero y más sencillo es un inductor fijo provisto de derivaciones de modo tal que la inductancia puede graduarse por etapas. Su símbolo está indicado en 2-8 C. El segundo modelo es una bobina con núcleo magnético móvil graduable hacia adentro o afuera por medio de un tornillo. Las figuras 2-9 A y B muestran un corte de este tipo de inductor, y su símbolo representativo.

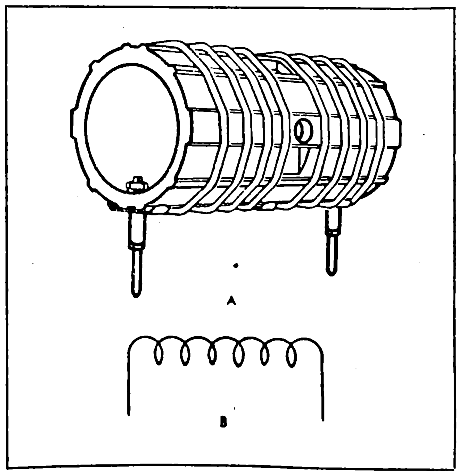


Figura 2-7. Inductor típico con núcleo de aire y su representación

Inductores variables: constan de dos bobinas construidas de tal modo que una de ellas puede girar dentro de la otra para variar la inductancia. La figura 2-9 C muestra el símbolo del inductor variable.

Capacitores

Ya hemos indicado las partes componentes que afectan al flujo de corriente. El capacitor, a diferencia del resistor y del inductor, tiene la propiedad de oponerse a los *cambios de tensión.* Esta propiedad de oponerse a los cambios de tensión se llama *capacidad* y se expresa en unidades llamadas *farad.* Un capacitor está formado fundamentalmente por dos o más láminas metálicas paralelas, separadas por aire o cualquier otro material aislante, que se ha llamado *dieléctrico.*

Hay tres tipos de capacitores: fijos, regulables y variables.

Capacitores fijos: proveen un valor constante de capacidad. La mayoría de los capacitores que se usan en electrónica pertenecen a este tipo. Son de varias clases: mica, papel o electrolíticos. Estas distintas clases se muestran en la figura 2-10 A y sus símbolos en B de la misma figura.

Capacitores de mica: usan mica como dieléctrico. Los capacitores de mica, como los resistores

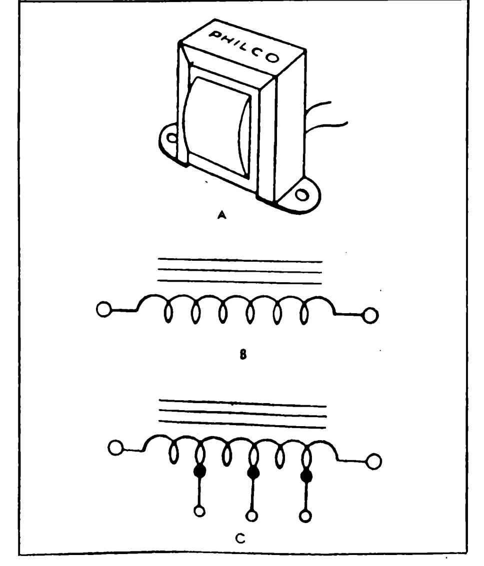


Figura 2-8. Inductor típico con núcleo de hierro; símbolos para los tipos fijos y con derivaciones

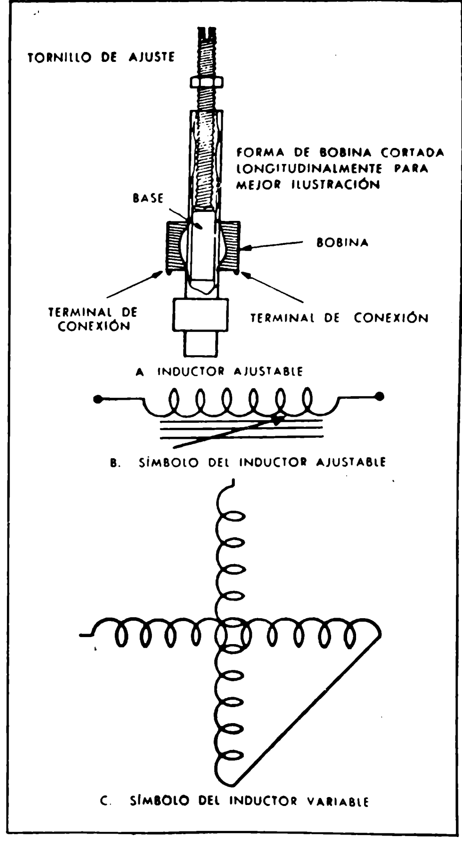


Figura 2-9. Inductores ajustables y variables; sus representaciones

fijos, están marcados según un código de colores para indicar el valor de la capacidad.

Capacitores de papel: están construidos con papel impregnado de cera para el dieléctrico y hojalata para las láminas conductoras.

Capacitores electrolíticos: se forman por la acción química que produce dentro de ellos una película delgadísima de óxido que hace de dieléctrico. En consecuencia, estos capacitores están polarizados y deben ser conectados de acuerdo con su polaridad marcada.

Capacitores regulables: se usan cuando es necesario graduar la capacidad, inicialmente o de tiempo en tiempo. Estos capacitores se conocen como

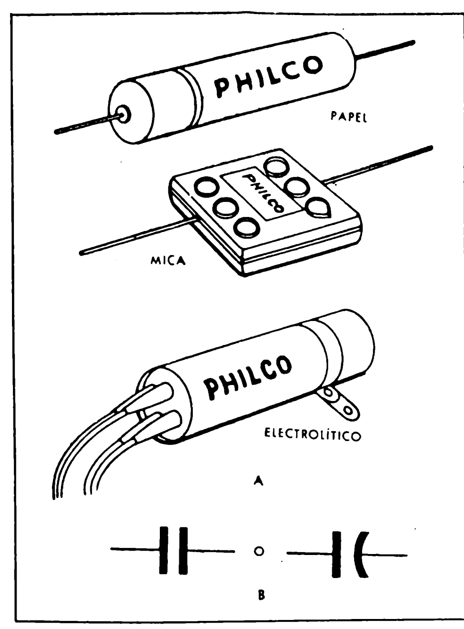


Figura 2-10. Capacitores fijos y símbolos correspondientes

"trimmers" y se usan con profusión para ajustes muy finos de sintonía de aparatos de radio. Los "trimmers" se montan con dieléctrico de mica o de aire. La figura 2-11 muestra ejemplos de "trimmers" regulables, junto con su símbolo.

Los *capacitores variables* se usan donde la capacidad debe variarse continuamente. Se emplean en control de sintonía para casi todos los receptores y transmisores de radio. Un capacitor variable consiste en dos armaduras de láminas metálicas aisladas una de otra y dispuestas de modo que una armadura de placas puede moverse intercalada en la otra. La armadura estacionaria se llama estator; la móvil, rotor. Si los rotores de varios capacitores variables se conectan a un eje común, de manera que todos puedan controlarse al mismo tiempo, el conjunto se llama "condensadores en tandem".

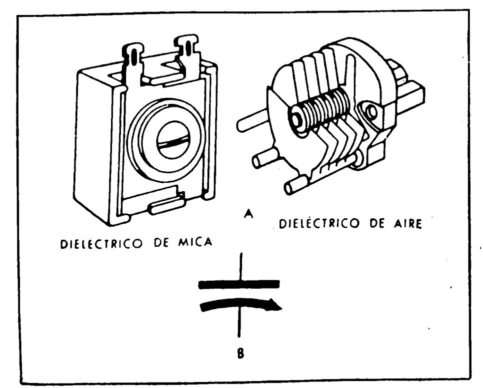


Figura 2-11. Capacitores ajustables (trimmer) y símbolo correspondiente

En la figura 2-12 puede verse un capacitor variable y su símbolo.

Transformadores

El *transformador* es otro componente muy importante utilizado en equipos electrónicos. Si se colocan aproximadas dos bobinas de alambre, y por una de ellas pasa una corriente alterna, la segunda bobina resulta afectada por la corriente que pasa por la primera bobina. Este efecto se llama *efecto de transformación* y se basa en principios magnéticos. Los transformadores se clasifican en tres tipos o clases generales según su aplicación: *transformadores de entrada o poder, transformadores de audiofrecuencia,* y *transformadores*

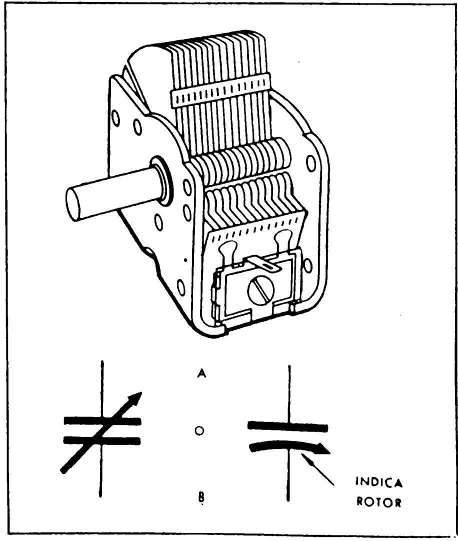


Figura 2-12. Capacitor variable y símbolo correspondiente

de radiofrecuencia. Los transformadores de poder y de audiofrecuencia tienen núcleos de materiales magnéticos, generalmente algún tipo de hierro. Los transformadores de radiofrecuencia se diseñan generalmente con núcleo de aire. Sin embargo, en algunos transformadores de radiofrecuencia se usan núcleos magnéticos muy pequeños de hierro pulverizado. Se los denomina *transformadores de frecuencia intermedia (f.i.).*

La figura 2-13 muestra dos tipos diferentes de transformadores y sus símbolos.

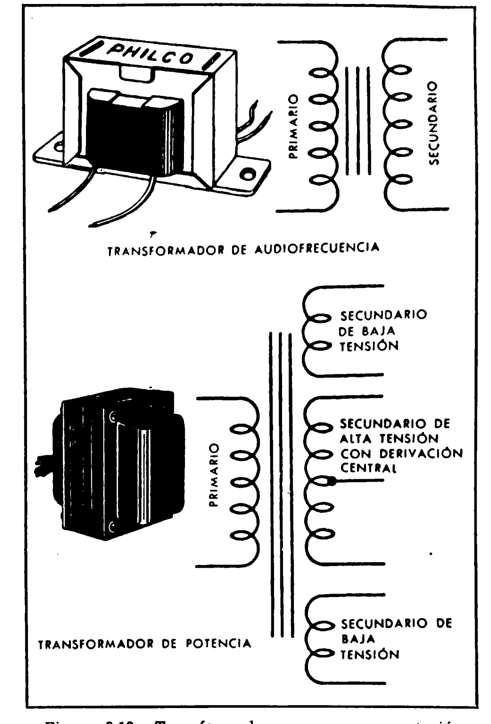


Figura 2-13. Transformadores y su representación

2-8 SIMBOLOS Y DIAGRAMAS DE CIRCUITOS

Se ha explicado que los equipos electrónicos se construyen con un número de componentes o partes, unidas todas por conductores, y conectadas a una fuente de tensión.

La corriente que fluye del terminal negativo de una batería a través de los componentes, hacia el terminal positivo, sigue un camino completo. Este camino se llama *circuito eléctrico.* La simbolización de los variados componentes del circuito es la "taquigrafía" empleada para dibujar los componentes en un circuito eléctrico. Durante el estudio del resistor, capacitor, inductor y transformador, se han visto varios símbolos y representaciones gráficas. En el ápendice se ofrece una lista completa de los símbolos más comunes en los circuitos.

Hay tres tipos de diagramas que se emplean para mostrar la interconexión de las partes de un equipo electrónico: *fotográfico, esquemático* y *block.* El *diagrama fotográfico* (fig. 2-14 A) se usa para mostrar los detalles físicos de los componentes y del circuito como serían vistos por el ojo humano. Un dibujo de este tipo ofrece ciertas ventajas; por ejemplo, un principiante podría ver simplemente un grupo de partes, compararlas con el diagrama, y armar el circuito como se muestra. Sin embargo, desde que el equipo moderno se ha hecho tan complejo, no resulta práctico usar un diagrama fotográfico para este propósito.

El *diagrama esquemático* no se complica con la representación física de las partes, sino que es presentado prolijamente mediante el uso de símbolos fáciles de entender y dibujar. Con la ayuda del diagrama esquemático es fácil identificar el tipo de circuito y ver cómo se adapta al resto del equipo. La figura 2-14 B muestra un diagrama fotográfico convertido parcialmente en esquemático. La figura 2-14 C muestra un dibujo esquemático completo, versión del circuito de la parte A de la misma figura.

Esta transición de fotográfico a esquemático se presenta solamente con fines de ilustración. Actualmente, en la práctica, el diagrama esquemático es el dibujo básico del cual surge la disposición de partes y diagramas block desarrollados para la construcción inicial del equipo.

El *diagrama block* es similar a un diagrama fotográfico, salvo que los componentes se muestran simplemente como rectángulos o círculos. La colocación o ubicación de las partes es correcta para el circuito de un equipo en particular, y se muestran las conexiones de alambre conectadas de una pieza a la otra. Los diagramas block se usan en abundancia en las fábricas, para la construcción de equipos electrónicos, y por los técnicos para el mantenimiento de cada equipo.

Tipos de circuitos eléctricos

Los circuitos eléctricos pueden dividirse en tres grupos: *en serie, en paralelo* y *en serie-paralelo.*

Un *circuito en serie* es una agrupación de par-

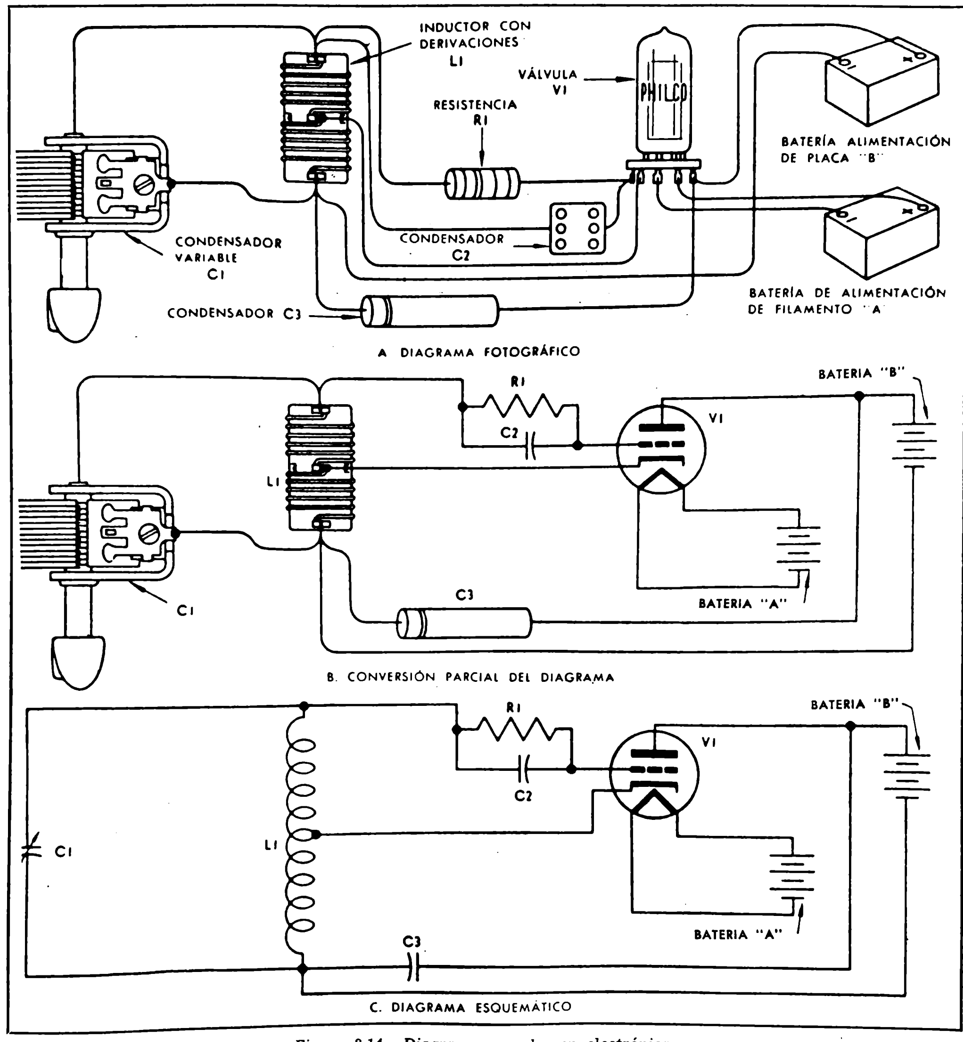


Figura 2-14. ***Diagramas*** *usuales en electrónica*

tes que provee un solo paso de corriente. La figura 2-15 A muestra un circuito en serie. Del diagrama se deduce que la corriente sigue un solo camino. Cualquier cantidad de elementos puede conectarse de esta forma, para formar un circuito en serie.

Un *circuito en paralelo* es una agrupación de componentes que provee dos o más pasos a la corriente. La figura 2-15 B muestra una agrupación de elementos en paralelo. Del diagrama podemos ver que la corriente de la batería toma dos caminos separados a través del circuito. Si se agregan

componentes adicionales en paralelo con los pasos o ramas R_1 y R_2, ellos serán recorridos también por la corriente.

Un *circuito en serie-paralelo* es aquél que comprende uno o más circuitos en serie combinados con circuitos en paralelo.

La figura 2-15 C muestra este tipo de circuito. Se notará que en la porción en serie del circuito R_1 existe solamente un paso de corriente, pero en la porción en paralelo R_2 y R_3 hay dos pasos de corriente. Puede combinarse cualquier número de circuitos en serie con cualquier cantidad de circuitos en paralelo, para formar un circuito en serie-paralelo.

2-9 POTENCIAS DE DIEZ

Al medir resistencias, capacidades, inductancias y frecuencias de circuitos electrónicos, se observará que se emplean a menudo cantidades muy grandes, como 3.000.000.000, y cantidades muy pequeñas, como 0,000.001.250.

En el caso del megohm, equivalente a 1.000.000 de ohm, y el micromicrofarad, unidad de capacidad igual a 1/1.000.000.000.000 farad, éstos tienen tal cantidad de ceros que son difíciles de escribir y manejar en operaciones matemáticas. Por este motivo se usa un método que permite expresar números con muchos ceros en forma sencilla, y que se llama *potencias de diez.*

Expresado como potencia de diez, 1.000.000 se escribe 10^6 y se lee "diez a la sexta potencia" o "diez a la sexta" y 1/1.000.000.000.000 se escribe $1/10^{12}$ ó 10^{-12} y se lee "diez a la menos doce". Los números 6 y —12 se llaman *exponentes,* e indican cuántos números diez deben multiplicarse entre sí para obtener las cifras grandes buscadas. El número 10 es llamado *base* y los exponentes (6 y —12), potencias de diez. El exponente de una potencia de diez puede ser positivo o negativo (10^6; 10^{-12}). La tabla 2-1 muestra algunas potencias de 10 y los números que representan.

En el caso de exponentes positivos, la potencia indica el número de lugares que la coma decimal debe correrse hacia la *derecha,* empezando desde la posición siguiente al 1. En el caso de exponentes negativos, el exponente indica cuántos lugares debe correrse la coma adicional hacia la *izquierda,* comenzando desde la misma posición.

Así: 10^7 = 10.000.000 (se corre la coma decimal 7 lugares desde 1 hacia la derecha)

y: 10^{-3} = 0,001 (se corre la coma decimal 3 lugares desde 1 hacia la izquierda)

TABLA 2-1. POTENCIAS DE DIEZ

Exponentes positivos		Exponentes negativos	
Número	Potencia de diez	Número	Potencia de diez
1	10^0	1	10^0
10	10^1	0.1	10^{-1}
100	10^2	0.01	10^{-2}
1,000	10^3	0.001	10^{-3}
10,000	10^4	0.0001	10^{-4}
100,000	10^5	0.00001	10^{-5}
1,000,000	10^6	0.000001	10^{-6}

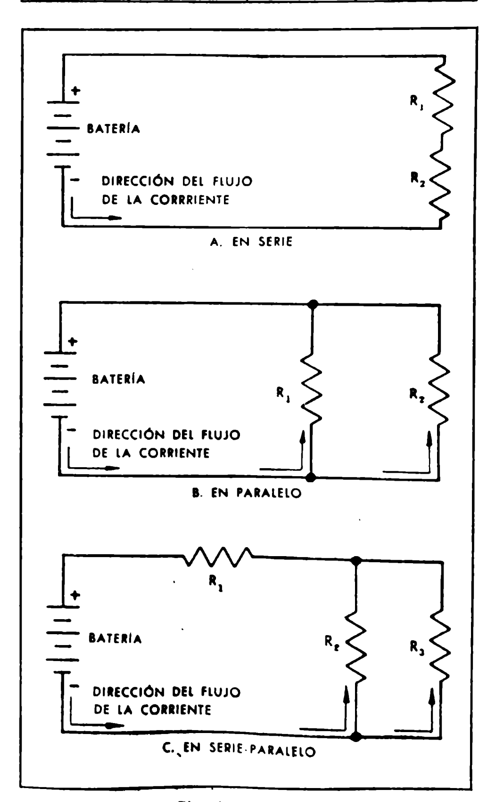


Figura 2-15. Circuitos eléctricos elementales

Puede representarse cualquier número como un número entre 1 y 10 multiplicado por una potencia de 10. Por ejemplo: un coulomb, unidad de carga eléctrica, representa una carga total de

6.280.000.000.000.000.000 de electrones. En términos de potencia de 10, este gran número se escribe brevemente: $6,28 \times 10^{18}$.

En forma similar, la carga de un electrón, que es igual a 0,000.000.000.000.000.000.16 coulomb, se escribe cómodamente como potencia de 10 así: $1,6 \times 10^{-19}$ coulomb.

Cuando el número a expresar como potencia de 10 no es una potencia simple de 10, se obtiene el mismo fin escribiendo las cifras indicativas del número, colocando la coma decimal después de la primera cifra, e indicando como multplicador a 10 elevado a una potencia equivalente al número de lugares que ha sido desplazada la coma decimal. Se usa un exponente positivo cuando la coma decimal se corre hacia la izquierda, y un exponente negativo cuando se corre hacia la derecha. La forma preferida es escribir la coma decimal después de la primera cifra significativa; sin embargo esto no es obligatorio, puesto que el exponente de 10 está hecho para indicar el número de lugares que debe ser corrida la coma decimal.

Reglas para el uso de las potencias de 10

Las reglas para el uso de las potencias de 10 siguen las leyes establecidas para los exponentes en álgebra elemental, que son:

1) Para sumar o restar números expresados en potencias de 10, sus exponentes deben ser los mismos numéricamente. El resultado de la operación llevará entonces el mismo exponente.

2) Para multiplicar números expresados en potencias de 10, sus exponentes deben sumarse.

3) Para dividir números expresados en potencias de 10, el exponente del divisor debe ser restado del exponente del dividendo.

4) Para elevar al cuadrado números expresados en potencias de 10, los exponentes deben ser multiplicados por 2.

5) Para extraer la raíz cuadrada de un número como potencia de 10, el exponente debe ser dividido por 2.

2-10 PREFIJOS USADOS PARA UNIDADES ELÉCTRICAS

La electrónica abarca vastísimas escalas de tensión, corriente, capacidad, inductancia, frecuencia, y potencia. Por ejemplo, en un receptor de televisión, la señal recibida puede tener tensiones medidas en millonésimas de volt y a frecuencias medidas en cientos de millones de ciclos por segundo. Los valores de capacidad e inductancia alcanzan valores de millonésimas o milésimas de unidades (farad y henry respectivamente). En contraste, un transmisor de radio o de radar puede emitir señales con tensiones de miles de volt y potencias de millones de watt. Se usa un sistema de prefijos para indicar el número de ceros que sigue o precede las cifras significativas de números muy grandes o pequeños. Por ejemplo: 1.000.000 de ciclos puede expresarse como: 1 megaciclo (el prefijo *mega* indica 1.000.000). Similarmente, 1/1.000.000 de farad puede expresarse como 1 microfarad (el prefijo *micro* indica 1/1.000.000). La tabla 2-2 muestra los prefijos más comunes, la magnitud que ellos representan, sus potencias de 10 equivalentes, y las unidades eléctricas comunes formadas por el uso de los prefijos.

En la mayoría de las ecuaciones eléctricas, los valores de tensión, corriente y otras magnitudes, deben convertirse en ampere, volt y otras unidades básicas, antes de ser sustituidas en las ecuaciones. Para convertir una unidad en otra, la unidad a convertir debe multiplicarse por la potencia de diez correspondiente. El método usado para convertir las unidades comunes es el siguiente:

TABLA 2-2. PREFIJOS USADOS PARA UNIDADES ELÉCTRICAS

Prefijo	Magnitud	Potencia Equivalente de diez	Unidad eléctrica
Mega o meg (M)	1,000,000	10^{6}	Megohm Megaciclo
Kilo (K)	1000	10^{3}	Kilociclo Kilovolt Kilowatt
Mili (m)	$\frac{1}{1000}$	10^{-3}	Milivolt Miliampere Milihenry
Micro (μ)	$\frac{1}{1,000,000}$	10^{-6}	Microvolt Microfarad Microhenry
Pico ($\mu\mu$)	$\frac{1}{1,000,000,000,000}$	10^{-12}	Micromicro-farad

1) Mega: El prefijo *mega* (o *meg*) significa *un millón* (1.000.000, o 10^{6}).

Para convertir unidades mega en unidades básicas, se multiplican las unidades mega por 10^{6}. Por ejemplo:

5 megaciclos $= 5 \times 10^{6}$ ciclos $= 5.000.000$ ciclos.

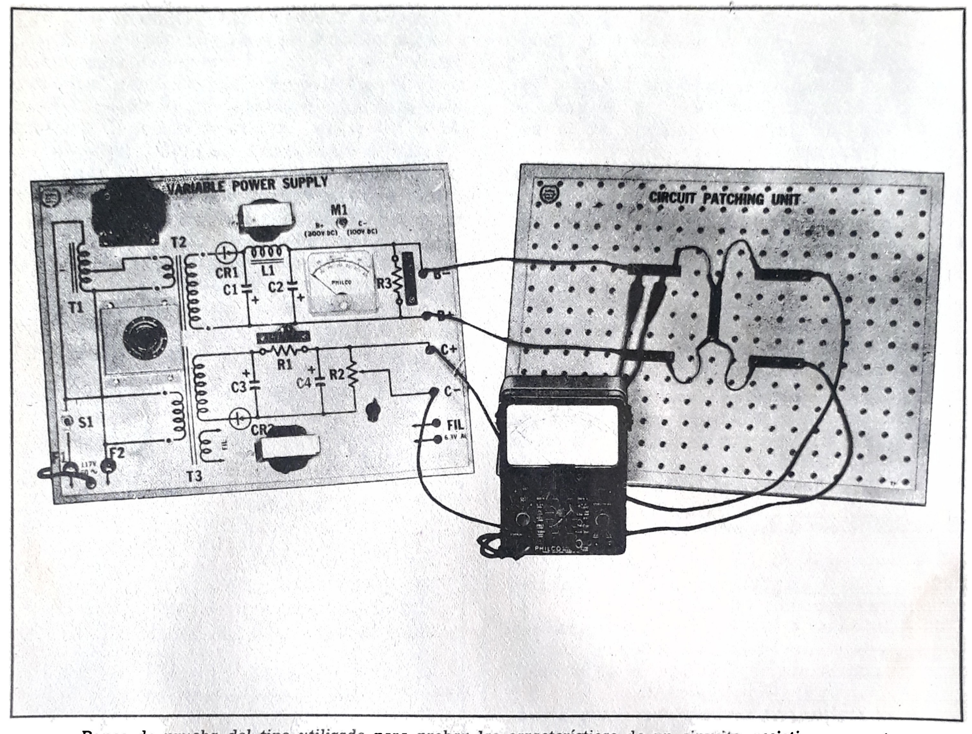
3,6 megohm $= 3,6 \times 10^{6}$ ohm $= 3.600.000$ ohm.

2) Kilo: El prefijo *kilo* significa *mil* (1.000, o 10^{3}).

Para convertir unidades kilo en unidades básicas, se multiplican las unidades kilo por 10^{3}.

Ejemplos:

540 kilociclos $= 540 \times 10^{3}$ ciclos $= 540.000$ ciclos.



Banco de prueba del tipo utilizado ***para*** *probar las características de un circuito* ***resistivo en serie***

3,33 kilovolt = 3,33 × 10^3 volt = 3.330 volt.

62,7 kilowatt = 62,7 × 10^3 watt = 62.700 watt.

3) Mili: El prefijo ***mili*** significa *milésima parte* (1/1.000 ó 10^{-3}).

Para convertir unidades mili en unidades básicas, se multiplican **las unidades** mili por 10^{-3}. Por ejemplo:

15,3 milihenry = **15,3** × **10^{-3}** henry = 0,0153 henry.

5.000 milivolt = **5.000** × **10^{-3} volt** = 5 volt.

983 miliampere = **984** × **10^{-3} ampere** = 0,983 ampere.

4) Micro: El prefijo ***micro*** **significa** *un millonésimo* (1/1.000.000 ó 10^{-6}).

Para convertir unidades **micro** en unidades básicas, se multiplican las **unidades** micro por 10^{-6}

Por ejemplo:

1,57 microvolt = 1,57 × 10^{-6} volt = 0,00000157 volt.

220 microfarad = 220 = 10^{-6} farad = 0,00022 farad.

5) Micromicro: Este prefijo significa *un billonésimo* (1/1.000.000.000.000, ó 170^{-12}).

Para convertir un billonésimo de unidad en unidades simples, se multiplican los billonésimos por 10^{-12}.

Ejemplo:

100 micromicrofarad = 100 × 10^{-12} = 0,0000000001 farad.

2-11 RESUMEN

El material de este capítulo familiariza al estudiante con los términos y unidades que encontrará en el campo de la electrónica. Las magnitudes eléctricas invisibles: tensión, intensidad y resistencia son vitales para todo circuito electrónico. Los componentes del circuito: resistores, capacitores e inductores, tienen características que controlan la acción del circuito. Estos componentes, cuando se conectan en un circuito eléctrico, se disponen de acuerdo con uno o más de los tres circuitos básicos: en serie, en paralelo y en serie-paralelo. Un circuito en serie es aquél en el cual los componentes se conectan de tal manera que hay un solo camino para que circule la corriente. El circuito en paralelo es aquél en el cuál hay dos o más caminos por los cuales fluye la corriente. En un circuito en serie-paralelo los componentes se colocan de tal manera que algunas combinaciones de componentes significan un circuito en serie, y otras, un circuito en paralelo.

Un diagrama esquemático muestra la interconexión de los componentes mediante el uso de los símbolos. El uso de prefijos y potencias de 10 permite representar en forma simple las más grandes magnitudes.

CUESTIONARIO

1. ¿Qué significa *polaridad?*
2. ¿Cuál es el concepto moderno de *corriente*?
3. Defina el *volt.*
4. Defina el *coulomb.*
5. Defina el *ampere.*
6. ¿Qué se entiende por *densidad de corriente?*
7. Si $1{,}884 \times 10^{19}$ electrones pasan por un punto dado de un conductor en un segundo ¿cuántos ampere pasan?
8. ¿A qué velocidad se transmiten los efectos del movimiento de los electrones?
9. ¿Qué magnitud eléctrica se mide en ohm?
10. ¿Cuál es la diferencia entre corriente alternada y corriente continua?
11. Nombre tres tipos de resistores.
12. ¿Cuál es la diferencia entre un reóstato y un potenciómetro?
13. Nombre dos tipos de inductores regulables.
14. ¿Con qué magnitud de un circuito (intensidad, tensión, resistencia) está asociado un condensador?
15. ¿Qué precaución debe adoptarse cuando se conecta un condensador electrolítico en un circuito?
16. Nombre tres tipos generales de transformadores.
17. Nombre tres tipos de diagramas usados para mostrar la interconexión de los componentes de un circuito.
18. ¿Qué se entiende por *circuito eléctrico?*
19. Defina el término *circuito en serie.*
20. ¿Cuál es el rasgo distintivo de un circuito en paralelo?
21. Defina el término circuito en *serie-paralelo.*
22. ¿Cuál es la ventaja de usar potencias de diez cuando se trabaja con números de muchos dígitos?
23. Expresar los siguientes números en términos de potencias de diez:

1.358
2.100
24.000
0.00003
0.0045
3.000.000
1.250.000.000

24) Nombre los cinco prefijos más comunes, y explique el significado de cada uno.

25) Exprese los siguientes valores en forma sencilla, usando los prefijos más apropiados. Expresarlos también en potencias de diez.

0.0000000003	farad
0,01	henry
0.00065	volt
1.000.000	ohm

CAPITULO III

Uso de Aparatos de Medición para Circuitos Electrónicos

3-1 Introducción

Los primeros científicos tuvieron grandes dificultades para explicar la acción de la electricidad, debido a que las magnitudes a manejar, como intensidad, tensión y resistencia, no podían medirse rápidamente ni ser percibidas por el ojo humano. A medida que progresaba el conocimiento científico se hacía evidente la necesidad de contar con algún medio de observación y medición exacta de los efectos de la corriente eléctrica. Para satisfacer esa necesidad fueron creados varios instrumentos de medida.

Los tres principales instrumentos de medición de magnitudes eléctricas son: el *amperímetro* (para medir intensidad), el *voltímetro* (para medir tensiones) y el *óhmetro* (para medir resistencia). Las características de estos tres medidores se combinan a menudo en una unidad, para formar un instrumento de medida compacto llamado *instrumento múltiple o multímetro.*

Este capítulo está dividido en dos partes: la primera se refiere a la aplicación y precauciones que deben seguirse al usar instrumentos de medida en los circuitos eléctricos. La segunda parte abarca los elementos de protección, como ser: fusibles, llaves interruptoras y relés de sobrecarga, que se utilizan para limitar el flujo de corriente, con fines de seguridad.

3-2 AMPERÍMETROS

El amperímetro es el instrumento que se usa para indicar la cantidad de corriente de un circuito eléctrico. Para medir la cantidad de corriente que circula, el amperímetro debe ser colocado *en serie* con el circuito. La figura 3-1 ilustra la conexión correcta de un amperímetro.

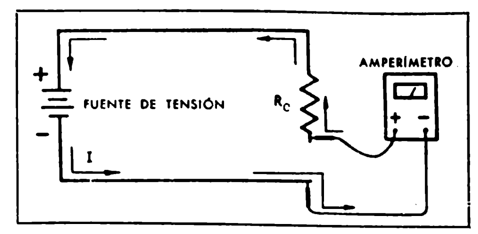


Figura 3-1. Conexión del amperímetro en un circuito

Aunque en este capítulo no se estudia la teoría que explica cómo o porqué funciona un amperímetro se describe, sin embargo, el circuito interno del mismo junto con sus piezas, para que sea posible comprender cómo el amperímetro mide variaciones de corriente. El corazón del amperímetro común es la bobina móvil, o mecanismo medidor de D'Arsonval. Se usa un indicador solidario con dicha bobina para señalar, en una escala calibrada colocada bajo el indicador, la cantidad de corriente que circula por la bobina.

Los mecanismos medidores están clasificados generalmente según la máxima cantidad de corriente que requieren para llevar la aguja indicadora hasta el tope de la escala. Esta clasificación se llama *sensibilidad del instrumento.*

Amperímetros de corriente continua (C.C.)

Un amperímetro común para C.C. emplea solamente el mecanismo de bobina móvil para la medición de corriente continua. Una de las características del mecanismo medidor es que, para su uso correcto, la corriente debe pasar a través del mismo sólo en la dirección que indica la polaridad del amperímetro.

La figura 3-2 A muestra un amperímetro de C.C. conectado en un circuito eléctrico. Las dos resistencias, R_a y R_c, representan la resistencia del amperímetro y la resistencia total del circuito, respectivamente. Cuando se construye el amperímetro, se elige la resistencia R_a tan pequeña como sea posible, para que el valor de la corriente indicada por el mecanismo sea el verdadero valor que circula por el circuito y no sea alterado por

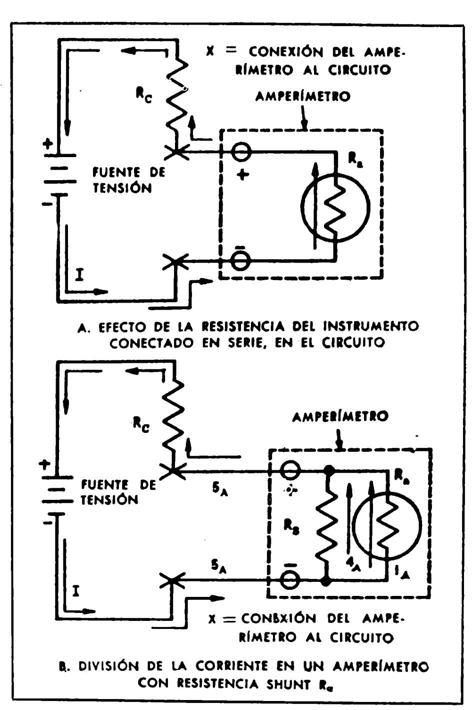


Figura 3-2. Efecto de la resistencia del amperímetro en la resistencia total del circuito

su resistencia. Se notará que el amperímetro tiene terminales marcados con los signos + y — para indicar la correcta conexión del mismo en el circuito.

El amperímetro de la figura 3-2 A tiene la desventaja de ser útil solamente para indicar un alcance de intensidad. Para medir valores mayores de corriente continua, debe incorporarse al amperímetro una resistencia en paralelo llamada *shunt del amperímetro*. Esta resistencia se conecta en paralelo con el mecanismo móvil del amperímetro (R_s en figura 3-2 B). Para lograr la desviación de la aguja indicadora *hasta* el tope de la escala, el shunt del amperímetro da un camino para desviar la corriente que excede la requerida por la sensibilidad del mecanismo móvil. Supongamos que la sensibilidad del mecanismo del amperímetro de la figura 3-2 B permite una marcación de *hasta* 1 ampere. Con el agregado de un valor correcto de resistencia en shunt, el circuito del amperímetro permite pasar un total de 5 ampere,

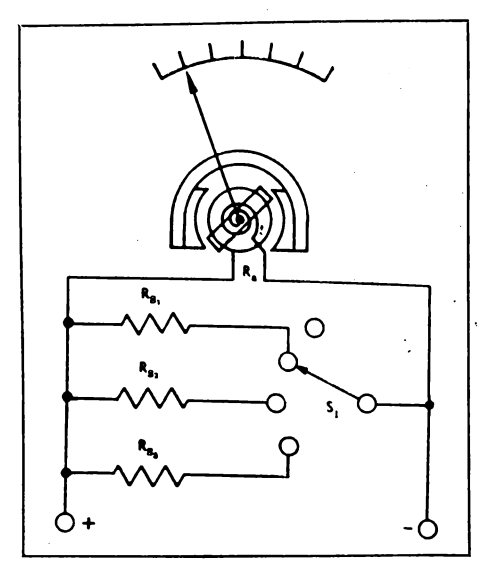


Figura 3-3. Esquema del amperímetro de alcances múltiples

antes de que la aguja se desvíe hasta señalar el tope de la escala —4 ampere a través del shunt y 1 ampere a través del amperímetro; luego, el alcance de medición del mismo ha sido aumentado por la adición de la resistencia en shunt. Un amperímetro de alcances múltiples (Figura 3-3) emplea varios shunts, conectados por una llave selectora (S_1) para permitir la medición de varios alcances de corriente.

Amperímetros de corriente alternada (C.A.)

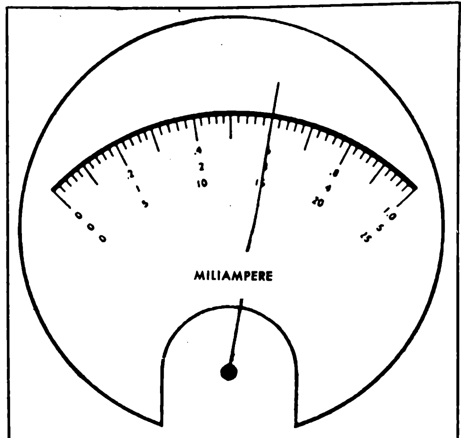
El amperímetro de C.A. más común es similar, en construcción y aplicación, al amperímetro de corriente continua. Sin embargo, requiere el uso de un componente adicional, un ***rectificador***, para convertir la corriente alternada en continua, pues el mecanismo de bobina móvil del amperímetro funciona con una sola polaridad.

Lectura de escalas

Para medir las diversas intensidades de corriente según la desviación de la aguja, se coloca una escala graduada en unidades normales (múltiplos o submúltiplos de estas unidades) debajo de la aguja indicadora. El método de adaptación de la escala al movimiento del instrumento para indicar los valores de corriente, se basa en que el ángulo girado por la aguja indicadora es directamente proporcional a la cantidad del flujo de corriente en la bobina móvil. A este método de calibración lo llamamos método de escala lineal. Un amperímetro puede calibrarse para indicar ampere, miliampere o microampere, según la intensidad de corriente requerida para desviar la aguja hasta el tope de la escala.

Escala de amperímetros de C.C.

En la figura 3-4 se muestra una escala típica de este caso. Si se observa la figura y la tabla



ESCALA (MA)	FACTOR MULTIPLICADOR	VALOR INDICADO (MA)
0-25		15
0-250	10	150
0-5		3
0-50	10	30
0-500	100	300
0-1.0		0.6
0-10	10	6.0
0-100	100	60.0

Figura 3-4. Lectura del amperímetro de corriente continua con la aguja descansando sobre una división principal de la escala

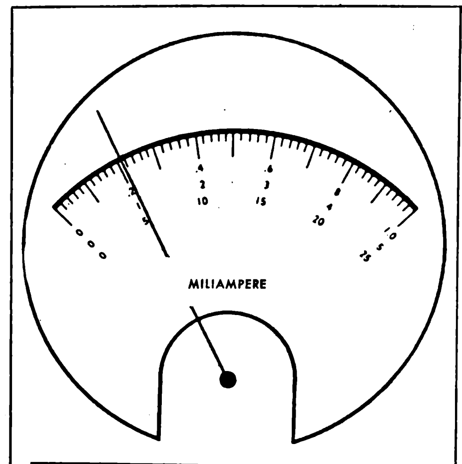
correspondiente, se puede ver que la escala representa un amperímetro del tipo de alcances múltiples, que tiene un total de 8 alcances posibles. Se observarán los distintos valores de marcación cuando la aguja descansa en una división mayor de la escala.

La figura 3-5 muestra la aguja indicadora descansando en una división intermedia de la escala. Cada una de las divisiones intermedias representa la mitad del valor obtenido sumando dos graduaciones numeradas consecutivas de la escala, y dividiendo por 2 el resultado. Si se realiza una cuidadosa observación de la posición de la aguja y de la escala, puede verificarse cada uno de los valores registrados para los diferentes alcances.

En muchas mediciones de corriente, la aguja se detendrá en un punto entre marcas; es necesaria entonces la interpolación para registrar la cantidad exacta de corriente que circula. Tal condición se ilustra en 3-6. La aguja descansa en una

ESCALA (MA)	MARCA INTERMEDIARIA	VALOR INDICADO (MA)
0-25	2.5	7.5
0-250	25.0	75.0
0-5	0.5	1.5
0-50	5.0	15.0
0-500	50.0	150.0
0-1.0	0.1	0.3
0-10	1.0	3.0
0-100	10.0	30.0

Figura 3-5. Lectura de las escalas de un amperímetro de C.C. con la aguja descansando sobre una división no numerada de la escala



ESCALA (MA)	MARCA INTERMEDIARIA	VALOR INDICADO (MA)
0-25	0.25	5.25
0-250	2.5	52:5
0-5	0,05	1.05
0-50	0.5	10.5
0-500	5.0	105.0
0-1.0	0.01	0.21
0-10	0.1	2.1
0-100	1.0	21.0

Figura 3-6. Lectura de las escalas de un amperímetro de C.C. con la aguja descansando en fracciones de división de la escala

posición ligeramente por encima de la primera marca numerada. Las pequeñas divisiones de la escala representan (cada una de ellas) dos décimos de la distancia entre una marca numerada y una intermedia. Para determinar el valor de corriente indicado, utilizaremos la escala de 0-25 ma como ejemplo. La aguja descansa a mitad de camino entre la posición de 5 ma y la primera división fraccionaria. Cada división fraccionaria de la escala 0-25 ma representa 0,5 ma. Por lo tanto, la escala indica 5,25 ma. (Para practicar con la escala, confrontar las indicaciones de la aguja del amperímetro para los valores de corriente de la tabla).

Cuando se toman las indicaciones de una escala, se tendrá la precaución de observar la aguja desde encima del amperímetro con el ojo y la aguja verticalmente en línea para que la determinación sea exacta. Mirando la aguja de soslayo, desde un costado, se produce un error en la lectura, que se llama *error de paralaje*.

Escalas de amperímetros de C.A.

La escala de un amperímetro común de C.A. a mecanismo de bobina móvil de D'Arsonval, se lee del mismo modo que los instrumentos de C.C.

Hay pocos tipos comunes de amperímetros que no lleven escalas lineales para indicar el flujo de corriente. Esos tipos de indicación no lineal se describirán más adelante, al estudiarse los instrumentos de medida.

Precauciones para el uso de amperímetros

Un amperímetro es un instrumento delicado y costoso, que puede estropearse fácilmente si no se lo usa como corresponde. Una caída o sacudida puede alterar el delicado ajuste del mecanismo medidor. También el flujo excesivo de corriente a través de la bobina, que cause la desviación de la aguja hasta el tope de la escala, puede quemar o destruir el mecanismo. Por estas razones, deben tomarse las siguientes precauciones:

1) Conectar siempre en serie el amperímetro con el circuito o parte del circuito a través del cual se quiere medir el flujo de corriente.

2) No conectar nunca un amperímetro a través de una fuente de tensión, como ser en paralelo con una batería o generador.

3) Usar un alcance suficientemente grande como para evitar que la aguja llegue al tope de la escala. Cuando se mida un valor de corriente desconocido, se empezará siempre con el más alto alcance del instrumento; luego se baja hasta lograr el alcance apropiado. Las indicaciones más seguras se obtienen en la región central de la escala.

4) Se observará la polaridad adecuada cuando se conecte un amperímetro de C.C. en un circuito. En la mayoría de los casos, el borne negro es el negativo (—), y el borne rojo es el positivo (+).

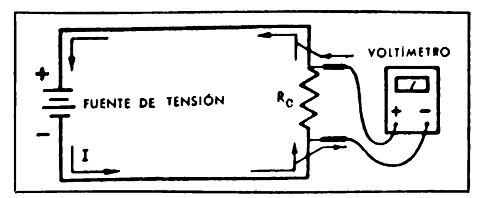


Figura 3-7. Conexión de un voltímetro a un circuito

3-3 VOLTÍMETROS

El voltímetro es el instrumento empleado para indicar la magnitud de la tensión en un circuito eléctrico. Para obtener una correcta medida de la tensión de un circuito, o de parte del mismo, el voltímetro debe ser colocado en paralelo con el circuito, según indica la figura 3-7.

Voltímetro de C.C.

Este instrumento sólo sirve para medir C.C., ya que la corriente debe atravesarlo en una sola dirección. La figura 3-8 muestra los componentes internos de un voltímetro (encerrados en la línea cortada), el cual está conectado como si fuera una unidad del circuito, para medir su tensión. Se notará que el circuito del voltímetro está compuesto por un amperímetro en serie con una resistencia (R_M). La resistencia R_M es de alto valor, coloca-

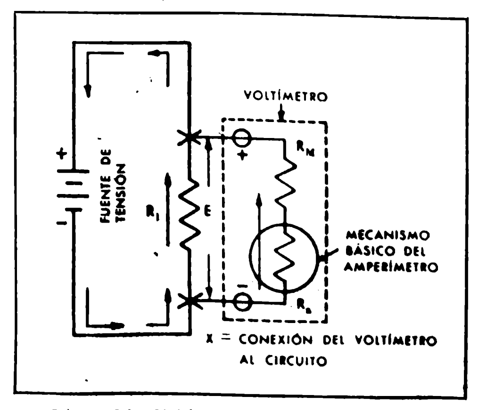


Figura 3-8. Voltímetro con multiplicador R_M conectado al circuito

da en serie con la resistencia del amperímetro para reducir el flujo de corriente a través del mecanismo. Como se muestra en la figura, cuando el instrumento está aplicado a los extremos de la R_1 componente del circuito, la corriente total del mismo se divide entre R_1 y el voltímetro. El flujo de corriente a través del voltímetro causa una desviación de la aguja. Si se calibra la escala del mecanismo medidor en volt, para una corriente específica que circule a través de la bobina móvil y sus resistencias en serie, puede obtenerse una escala completa de tensiones. Esta escala se extiende desde cero hasta el punto donde la tensión aplicada al circuito produce suficiente corriente a través del mecanismo medidor y R_M, y producir la desviación máxima de la aguja.

La resistencia R_M se llama *resistencia multiplicadora*, ya que si su valor óhmico es aumentado, sólo se necesitaría la misma corriente para causar la desviación completa de la aguja, pero para que circule esa corriente, será necesario aumentar el valor de la tensión aplicada. Este nuevo valor de tensión correspondería a un punto de calibración más alto de la escala del voltímetro, aumentando de este modo la capacidad del voltímetro, el que

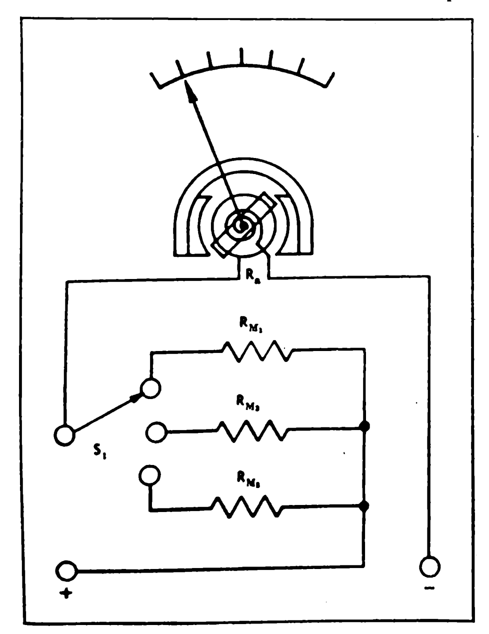


Figura 3-9. Esquema del voltímetro de alcances múltiples

indicará ahora un valor de tensión mayor que el máximo anterior. Mediante la intercalación de varias resistencias multiplicadoras de valores escogidos, puede obtenerse un voltímetro de alcances múltiples como el indicado en la figura 3-9.

Voltímetro de C.A.

El voltímetro de C.A. convencional es idéntico en construcción y aplicación al voltímetro de C.C., pero para convertir corriente alternada en continua y poder así accionar el mecanismo anterior, emplea una parte adicional, el rectificador.

Sensibilidad del voltímetro

La sensibilidad es la capacidad de este aparato para medir con precisión las tensiones de los circuitos. La sensibilidad de un amperímetro se expresa por la intensidad de corriente necesaria para obtener la máxima desviación de la aguja. La sensibilidad de un voltímetro se expresa en forma diferente, porque queda determinada por la relación entre la resistencia interna total del aparato con el máximo valor de tensión de la escala elegida. Entonces, la razón de la resistencia en ohm con la máxima tensión en volt, dará la sensibilidad, la que se expresa en *ohm por volt*. El alcance de sensibilidad más común en los voltímetros corrientes varía de 1000 ohm por volt. a 20.000 ohm por volt. Cuanto más grande es la sensibilidad, mayor es la precisión, ya que la corriente requerida para accionar el mecanismo se hace menor y, en consecuencia, al medir se introduce una variación mínima en las características del circuito.

Efectos de carga de los voltímetros

Cuando se conecta en un circuito con fines de medición, el voltímetro provee un paso paralelo. Este paso adicional facilita el pasaje del exceso de corriente (disminuye R total del circuito). Esta corriente adicional puede causar efectos indeseables en el circuito original. Los efectos, que son causados por el cambio de valor de la corriente original, se llaman *efectos de carga*. Para que sean mínimos, debe usarse un voltímetro de gran sensibilidad.

Lectura de las escalas de voltímetros

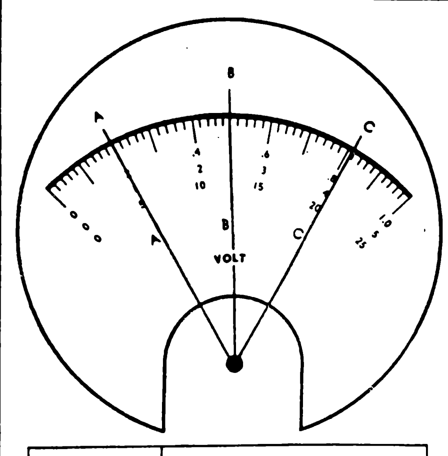
La disposición de la escala para la interpretación de mediciones de tensión en C.A. o C.C. es idéntica a la usada para amperímetros. Los tipos comunes de escalas de voltímetros están calibrados en volt, milivolt y microvolt.

La figura 3-10 muestra la disposición típica de una escala de voltímetro. Se presentan tres indi-

caciones de la aguja, representadas por las líneas AA, BB y CC, para familiarizar al estudiante con los procesos de lectura de escalas. Se compararán los valores tabulados con la escala del voltímetro para los diversos alcances que pueden elegirse mediante la llave selectora del medidor.

Precauciones para el uso de voltímetros

Un voltímetro debe ser manipulado y usado de acuerdo con las precauciones 3 y 4 dadas en la explicación sobre amperímetros. *Además, un voltímetro debe ser siempre conectado en paralelo* con *la porción de circuito a medir.*



ESCALA (VOLT)	VALORES INDICADOS (VOLT)		
	A	B	C
0-25	5	12.5	20.25
0-250	50	125.0	202.5
0-5	1	2.5	4.05
0-50	10	25.0	40.5
0-500	100	250.0	405.0
0-1.0	0.2	0.5	0.81
0-10	2.0	5.0	8.1
0-100	20.0	50.0	81.0

Figura 3-10. Lecturas en las escalas del voltímetro de C.C.

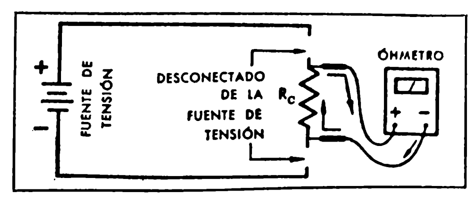


Figura 3-11. Conexión del óhmetro al circuito

3-4 ÓHMETROS

El óhmetro es el instrumento que se utiliza para medir la resistencia eléctrica que ofrece un circuito o una porción del mismo. El método adecuado para conectar un óhmetro en un circuito está ilustrado en la figura 3-11. La figura puntualiza una precaución muy importante en el uso del óhmetro, y es que un óhmetro *nunca* debe aplicarse a un circuito hasta que la fuente de energía no haya sido desconectada.

Óhmetro en serie

El óhmetro en serie, véase figura 3-12, es el tipo de óhmetro más comúnmente usado, y está diseñado para medir alcances de resistencia desde cero ohm hasta infinito (∞). (El término *infinito* indica una gran resistencia; casi tan grande como la de un aislador).

Se observa en la figura que la resistencia R_2 actúa como un shunt variable para el mecanismo medidor R_a, y que estos elementos conectados en para-

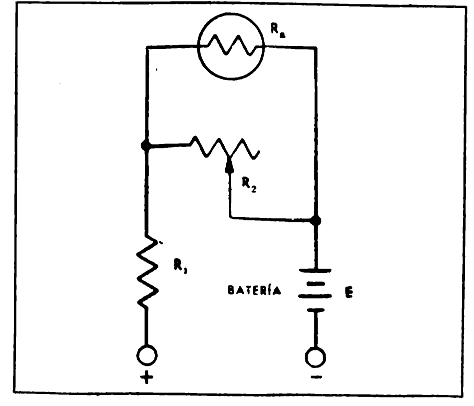


Figura 3-12. Circuito en serie del óhmetro

lelo están en serie con la batería y la resistencia fija R_1. El propósito con el cual se coloca R_1, es limitar el flujo de corriente a través del circuito del óhmetro hasta la intensidad necesaria para desviar la aguja del óhmetro hasta el tope de la escala. Previamente al uso del óhmetro, es necesario ajustarlo. Este ajuste se realiza con las dos puntas de prueba unidas, y moviendo la resistencia variable R_2 hasta que la aguja indicadora llegue al tope de la escala.

Cuando se conecta un valor de resistencia igual a R_1 entre los terminales positivo y negativo del óhmetro, decrece la intensidad circulante debido a la resistencia agregada, y se obtiene un descenso de la aguja indicadora hasta la mitad de la escala, aproximadamente. Si se conecta una resistencia igual a dos veces el valor de R_1 entre los terminales del medidor, fluye por el circuito una corriente aún menor, y se obtiene sólo una desviación pequeña de la aguja; por consiguiente, si la escala del instrumento está calibrada en muchos puntos, el aparato indicará directamente el valor de la resistencia que ha sido colocada entre los terminales. La escala indicará resistencia cero a la derecha (desviación máxima de la aguja), e infinito a la izquierda (poca o ninguna desviación).

Un óhmetro, como el amperímetro y el voltímetro, tiene generalmente más de un alcance. Los distintos alcances se obtienen mediante resistencias fijas como shunts del aparato. En la figura 3-13 se muestra un óhmetro de alcances múltiples.

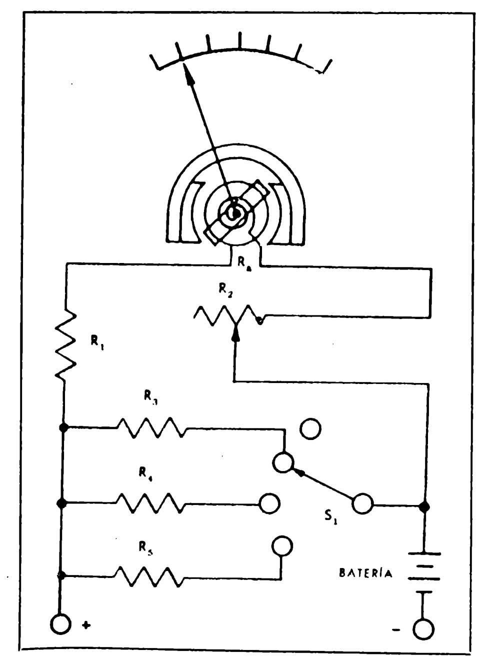


Figura 3-13. Esquema de un óhmetro de alcances múltiples

Óhmetros en shunt

Cuando el valor de resistencia a medir es extremadamente bajo se puede tener mayor precisión con el uso de un óhmetro en shunt. Este tipo de óhmetro se usa comúnmente en aplicaciones de laboratorio, donde se tiene muy en cuenta la exactitud. Un elemento característico del óhmetro en shunt es que las calibraciones de la escala están invertidas con respecto a los de fabricación común en serie.

En el óhmetro en shunt la posición cero ohm aparece a la izquierda, y la resistencia máxima registrable (generalmente no más que algunos cientos de ohm o menos) a la derecha.

Lectura de escalas

Nunca podrá exagerarse la importancia de interpretar correctamente y de obtener lecturas precisas de los instrumentos. La exactitud en las lecturas del óhmetro es tan importante como la de las mediciones con amperímetro y voltímetro.

Escala de óhmetros en serie

En la figura 3-14 se ve la escala de un óhmetro común. Se puede notar que en contraste con las escalas de calibración del amperímetro y el voltímetro, las escalas de calibración del óhmetro no son lineales. Como resultado, los valores tomados de la porción de la escala para altas resistencias son relativamente difíciles de interpretar, porque las divisiones de la escala representan grandes saltos en los valores de resistencia. Para obtener valores de una precisión razonable, el selector de alcances (llave selectora) del óhmetro deberá ajustarse al punto donde la indicación de la aguja cae cerca de la región media de la escala.

Las posiciones de la llave selectora de alcances se inicia generalmente por marcas tales como: Rx1; Rx1000; Rx10000; Rx100000. Esta marcación indica que al realizar una medición, el valor indicado por la aguja debe ser multiplicado por el Rx correspondiente de la llave selectora, a fin de obtener el valor de la resistencia medida. Por ejemplo, cuando se mide una resistencia de 150.000

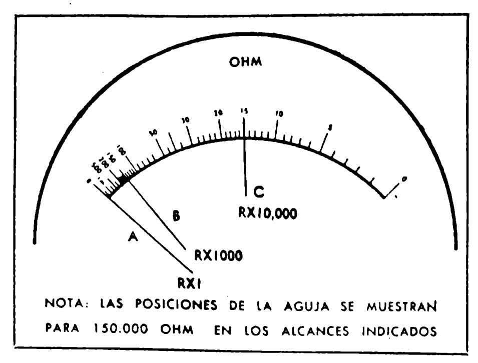


Figura 3-14. Lecturas en las escalas del óhmetro en serie

ohm, las indicaciones A, B y C de la aguja (figura (3-14) representan los alcances de Rx1, Rx1000 y Rx10000. Es muy importante tener en cuenta que para asegurar una indicación exacta deben ponerse las puntas de prueba en cortocircuito y variar el ajuste a cero para que en cada alcance la aguja llege a la marca tope de la escala.

Escalas de óhmetros en paralelo o en shunt (baja resistencia)

La escala de resistencia de un óhmetro en paralelo tiene el cero a la izquierda, y el máximo a la derecha, como las escalas de amperímetro y voltímetro antes expuestas. Puede verse la escala de un óhmetro en shunt en la figura 3-15. Se observará que el máximo valor de resistencia que puede ser medido con esta escala es de sólo 10 ohm. Como el óhmetro en paralelo tiene solamente una escala —la escala de baja resistencia— el valor se toma directamente de la escala. Se puede observar que las marcas graduadas están bien separadas para los valores de R más bajos, lo cual hace posible obtener un valor más exacto para las pequeñas resistencias.

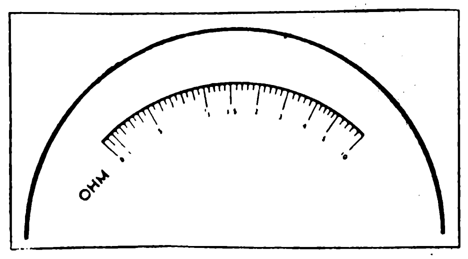


Figura 3-15. Representación de la escala de baja resistencia

Uso de óhmetros

Aunque el óhmetro es un instrumento muy importante, no es tan exacto como un amperímetro o un voltímetro. Por esta razón, no se puede esperar de un óhmetro normal una indicación de resistencia con más de 5 % ó 10 % de exactitud. Además de la medición de resistencia, el óhmetro es un instrumento muy útil para controlar la continuidad de un circuito, especialmente cuando hay dificultades con un circuito electrónico, o al armar un circuito nuevo, y la inspección visual del paso completo de la corriente no puede hacerse con seguridad. No siempre es evidente si un circuito está completo, o si la corriente está fluyendo por una parte indebida del circuito por contacto accidental con partes adyacentes. El mejor medio de controlar un circuito en estas condiciones es enviar una corriente a través del mismo. Si el conductor hace un circuito completo, la corriente fluirá a través del circuito. El óhmetro es el instrumento ideal para controlar circuitos de esta manera. Provee la energía para mandar corriente a través del circuito, y el instrumento para indicar si hay corriente. Para efectuar dicha comprobación, primero se estudia el diagrama del circuito, y luego se controlan las partes correspondientes del mismo con el óhmetro. Este indicará conducción perfecta (cero ohm), conducción parcial (cuando hay resistencia) o ninguna conducción (resistencia infinita, o circuito abierto).

Precauciones en el uso de óhmetros

Las mismas precauciones, en general, que usamos para los voltímetros y amperímetros son aplicables al óhmetro a causa de su delicado mecanismo medidor. Además, *un óhmetro no debe, por ninguna causa, conectarse en un circuito mientras la fuente de energía esté conectada al mismo.*

3-5 INSTRUMENTOS MULTIPLES O MULTIMETROS

Combinando un amperímetro, voltímetro y óhmetro de alcances múltiples en un solo aparato, éste es capaz de llevar a cabo casi todas las pruebas necesarias en un circuito de un equipo electrónico. Tal combinación de instrumentos se denomina ***multímetro*** (también se lo llama Tester, universal tester, volt-ohm-amperímetro o circuito analizador). Un elemento clave para el funcionamiento del instrumento es la llave selectora, que permite la adecuada selección de los circuitos internos, para asegurar en cada medición el uso de un alcance solamente.

Funcionamiento del circuito del multímetro

En la figura 3-16 se muestra un diagrama simplificado de un multímetro sencillo. Obsérvese que las tres secciones de la llave giratoria marcadas S1-A, S1-B, S1-C, están montadas sobre el mismo eje. Estas llaves representan el control selector de *función* o servicio, para la selección del tipo de medida deseado.

Como se indica en la figura, las posiciones 1, 2 y 3 representan las posiciones óhmetro, amperímetro y voltímetro, respectivamente. Para comprender la disposición general del circuito del instrumento, se sigue el trazo a través del circuito de la figura 3-16, para cada posición de la llave S_1 empezando en el terminal negativo y terminando en el positivo. Se comparan los circuitos trazados para las tres posiciones con los circuitos dados en las figuras 3-13, 3-3 y 3-9. Si se siguen los pasos correctamente, se verá que la disposición del circuito del instrumento múltiple es idéntica a las disposiciones conjuntas de los circuitos del óhmetro, amperímetro y voltímetro.

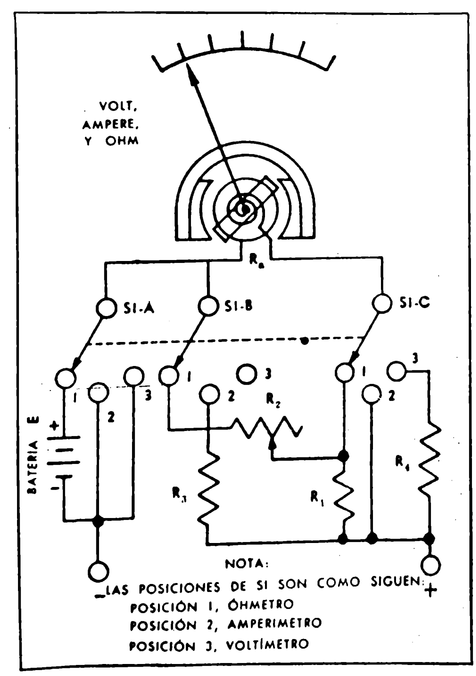


Figura 3-16. Circuito fundamental del probador múltiple

Escalas del multímetro

Generalmente, estos instrumentos tienen circuitos más complejos que el sencillo esquema de la figura 3-16, dado que tienen más de un alcance de medición de corriente, tensión y resistencia.

En la figura 3-17 se muestra la escala de un instrumento capaz de medir distintos alcances de resistencia, tensiones de C.C. y corrientes. Nótese que la escala del instrumento múltiple es una combinación de la escala lineal de la figura 3-10 y la escala no lineal de la figura 3-14. El procedimiento para la lectura de las escalas es el mismo que el indicado para cada tipo de aparato de medición. La tabla de la figura 3-17 da los valores aproximados de escala en distintos alcances para las posiciones de la aguja indicadas en la figura.

3-6 CUIDADO Y MANEJO DE LOS INSTRUMENTOS

Nunca pueden ser excesivas las recomendaciones sobre el cuidado y manejo de los instrumentos. Como son instrumentos muy sencillos y delicados, el manejo violento puede dañar fácilmente el frágil mecanismo medidor, o torcer la aguja indicadora. Aunque tal torcedura puede no ser visible a simple vista, destruye la precisión del aparato. Cuando no se usan los instrumentos, deberán guardarse en un lugar seco y fresco, para prevenir la corrosión. Todas las precauciones indicadas previamente para cada aparato en particular, deberán ser tenidas en cuenta permanentemente mientras se hace uso de alguno de estos instrumentos.

3-7 APARATOS PROTECTORES PARA LA SEGURIDAD PERSONAL Y DEL EQUIPO

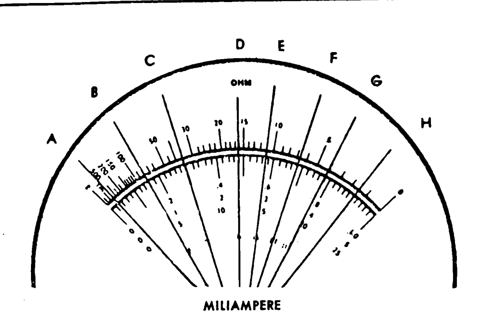
Las precauciones aconsejadas en la parte anterior de este capítulo se refieren en primer término al cuidado y seguridad de los instrumentos destinados a medir corriente, tensión y resistencia.

La seguridad del equipo que está siendo verificado debe también ser tenida muy en cuenta. Sin embargo, la seguridad y protección contra el shock eléctrico, del personal que realiza las mediciones, es lo más importante. Esta parte del capítulo expone algunos de los dispositivos más comunes usados en equipos eléctricos y electrónicos.

Fusibles

Los fusibles son artefactos protectores contra los cortocircuitos causados por conexiones accidentales de conductores normalmente aislados, y contra sobrecargas continuas.

Un ejemplo bien conocido es el fusible casero común. Este accesorio protege la casa contra incendio, el cual puede ser causado por la ruptura



	POSICIÓN DE LA LLAVE SELECTORA								
DESVIACIÓN	10V	100V	250V	500V	5 MA	10 MA	25 MA	RX1	RX1000	RX10,000
A	0.35	3.5	9.0	18	0.18	0.35	0.9	750	75,000	7,500,000
B	1.6	16	40	80	0.8	1.6	4.0	80	8,000	800,000
C	3.0	30	75	150	1.5	3.0	7.5	35	3,500	350,000
D	4.8	48	120	240	2.4	4.8	12.0	16	1,600	160,000
E	5.7	57	142.5	285	2.85	5.7	14.25	11	1,100	110,000
F	6.8	68	170	340	3.4	6.8	17.0	6.8	680	68,000
G	7.8	78	195	390	3.9	7.8	19.5	4.0	400	40,000
H	9.0	90	225	450	4.5	9.0	22.5	1.5	150	15,000

NOTA: TODOS LOS VALORES SON APROXIMADOS

de la aislación de la instalación eléctrica al recalentarse los alambres conductores por un exceso de corriente. Este exceso de corriente, superior al que toleran los conductores en frío, puede ser causado a su vez, por un cortocircuito en algún artefacto conectado. Los fusibles usados en equipos electrónicos, pese a ser de distinta construcción que los caseros, sirven fundamentalmente para el mismo fin. Cuando ocurre un cortocircuito o una sobrecarga, el fusible se funde o se volatiliza, abriendo de este modo el circuito eléctrico, es decir, cortando el flujo de corriente. Los fusibles más comunes usados en equipos electrónicos y su símbolo se representan en la figura 3-18.

El grado de protección del equipo contra cortocircuitos o sobrecargas, depende del calor generado en el núcleo del fusible por la corriente del circuito. Generalmente, el núcleo es de zinc o de algún otro metal similar, de baja resistencia y bajo punto de fusión. Cuando la corriente en un circuito es menor o igual que la corriente máxima para el fusible, éste está a temperatura inferior al punto de fusión. No obstante, cuando la corriente excede a la máxima permitida por el fusible, el exceso de calor generado en el núcleo lo funde rápidamente. De este modo, el circuito eléctrico se abre y los demás elementos del mismo son protegidos de la destrucción. Nunca debe usarse fusibles que tengan una tolerancia mayor de lo especificado, pues puede dañarse el equipo.

Interruptores

Un interruptor es una llave para abrir y cerrar circuitos; es, además, un accesorio de protección. En la figura 3-19 se ve un pequeño interruptor y los símbolos esquemáticos para distintos tipos de

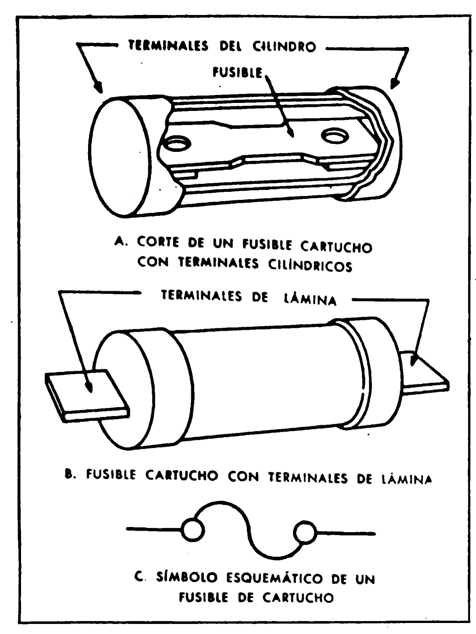


Figura 3-18. Representación simbólica de fusibles tipo cartucho

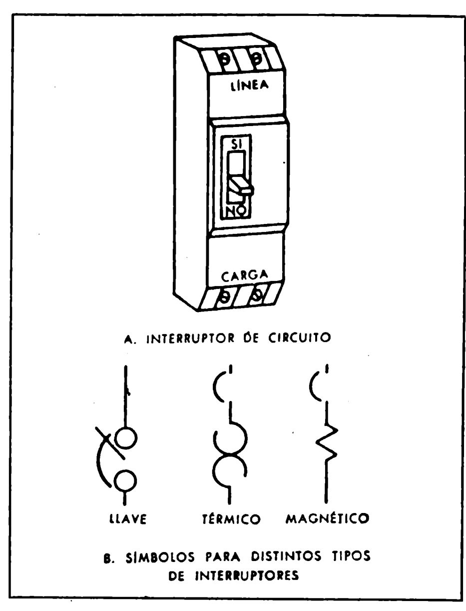


Figura 3-19. Interruptores de corriente

estos aparatos. Para activar un circuito, la perilla del aparato debe correrse hacia "Sí" o "LUZ" ("ON" en inglés). Para interrumpir el circuito, se debe volver la perilla hasta que aparezca "NO" ("OFF"). Cuando se cierra el circuito, la llave une los contactos con un puente. Para interrumpir el paso de corriente, la llave quita ese puente y deja los dos polos aislados uno del otro. El puente es accionado por un resorte para darle mayor velocidad. Las llaves pequeñas para circuitos electrónicos tienen elementos protectores conectados en serie con los contactos de interrupción de corriente, de modo que el flujo total del circuito pasa a través de los elementos protectores. Estos son elementos térmicos, similares a la resistencia bobinada de una tostadora eléctrica. El calor producido por el elemento térmico al pasaje de una corriente de sobrecarga, se transmite a un par bimetálico, que se curva con el calor. La curvatura del par acciona automáticamente el puente, que anula los contactos, dejando abierto el circuito. La apertura de un circuito mediante un par bimetálico no es instantánea, debido al tiempo que tarda el par en calentarse y curvarse.

Otro tipo de interruptor está equipado con un elemento magnético llamado electroimán, que se conecta en serie con el circuito, para protegerlo. El flujo normal de corriente a través del circuito, no tiene efecto en el funcionamiento del electroimán; sin embargo, cuando una corriente muy grande fluye a través de la línea, como en el caso de un cortocircuito, actúa el electroimán y libera instantáneamente al puente que mantenía unidos los polos del interruptor y abre el circuito. Esta llave electromagnética es de acción instantánea en la protección de los aparatos contra cortocircuitos.

Muchas llaves tienen 2 elementos: térmico y magnético, para proteger un determinado aparato o línea contra sobrecargas y cortocircuitos. Tales aparatos pueden ser graduados para cortes rápidos de corriente en caso de gran sobrecarga, o para cortes lentos en caso de sobrecargas que prolongan su duración más de un tiempo tolerable.

Relé o relevador de sobrecarga y contactores

Un relevador de sobrecarga es un aparato que detecta cortocircuitos y sobrecargas continuas. El relevador es similar en construcción a un pequeño interruptor. Los relevadores de sobrecarga poseen elementos térmicos o magnéticos que abren y cie-

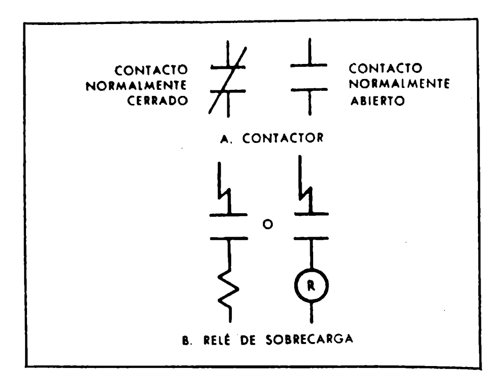


Figura 3-20. Diagramas esquemáticos para el contactor y relé de sobrecarga

rran sus contactos y están diseñados para intensidades relativamente pequeñas. Por esta razón, en la aplicación a un cortocircuito, los relevadores de sobrecarga se emplean generalmente junto con otro aparato de protección, como ser un contactor. Un contactor consiste en dos contactos que se abren o cierran mediante un electroimán. Cuando en un circuito ocurre un cortocircuito o una sobrecarga, el relevador de sobrecarga hace funcionar el contactor. Éste, a su vez, anula la corriente en el circuito. Luego, el relé de sobrecarga protege el circuito indirectamente, haciendo obrar al contactor, no actuando directamente como una llave interruptora. En la figura 3-20 pueden verse los símbolos del contactor y del relevador de sobrecarga.

Llaves protectoras

El aparato o mecanismo de seguridad de uso más amplio es la llave protectora, que es un tipo de llave cuyo estado permanente es CERRADO. Está fija a la tapa de acceso al equipo. Cuando ésta es quitada, o abierta, la llave se abre, cortando el acceso de corriente al circuito en el cual está conectada. Las llaves de este tipo están colocadas generalmente en serie con el circuito de entrada de las fuentes de alta tensión, según se puede apreciar en la figura 3-21. De esta manera, cuando se quita la tapa, o se abre la puerta de acceso, la llave abre el circuito de entrada. En esta forma, elimina la entrada de corriente dentro del equipo, protegiendo así al personal de mantenimiento del shock eléctrico de alta tensión.

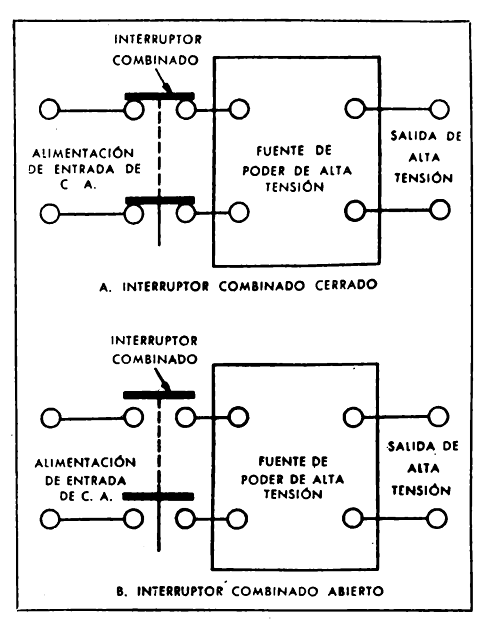


Figura 3-21. Interruptor combinado conectado en un circuito

3-8 RESUMEN

Los aparatos de medición que se usan en el campo de la electricidad y la electrónica, son herramientas industriales que proveen un medio de verificar el rendimiento de los circuitos y equipos en funcionamiento. Un amperímetro se usa para medir la corriente que circula en un circuito y se conecta en serie en el punto de medición deseado. Un voltímetro se usa para medir la tensión entre dos puntos del circuito y está en paralelo con el circuito bajo prueba. Un óhmetro se usa para medir el valor de la resistencia eléctrica y se aplica sólo después que la fuerza electromotriz se desconecta del circuito. Los aparatos protectores, como fusibles, interruptores, relevadores de sobrecarga, contactores y llaves protectoras sirven para proteger al personal del shock eléctrico, y al equipo, de daños innecesarios. No deben emplearse aparatos protectores que tengan una tolerancia que exceda a la especificada para una aplicación particular.

CUESTIONARIO

1. ¿Cómo se conecta un amperímetro para medir la corriente en un circuito?
2. Defina el término *sensibilidad del amperímetro.*
3. ¿Debe observarse la polaridad cuando se usa un amperímetro de C.C.?
4. ¿Emplea un amperímetro resistencias multiplicadoras?
5. ¿Cuál es el objeto de un resistor en paralelo?
6. ¿Cómo se conecta un voltímetro para medir la tensión presente en un circuito?
7. ¿Es el voltímetro un dispositivo que trabaja en base a tensión o a corriente?
8. ¿Para qué sirve una resistencia multiplicadora?
9. Nombre la unidad de medida de la sensibilidad de un voltímetro.
10. Cuando un voltímetro de baja resistencia interna está conectado en paralelo con un circuito para la medición de tensión, ¿qué efectos indeseables pueden ocurrir?
11. ¿Debe observarse la polaridad al usar un voltímetro de corriente continua?
12. Antes de conectar un voltímetro o amperímetro en un circuito, ¿qué precaución debe observarse para protegerlos?
13. ¿Cómo se provee un óhmetro común, de alcances adicionales?
14. ¿En qué dirección está calibrada la escala de un óhmetro en serie?
15. ¿Cuál es el fin primordial del control de ajuste de *cero* ohm?
16. ¿Por qué es necesario quitar la f.e.m. del circuito antes de usar un óhmetro?
17. ¿Es lineal la escala del óhmetro en paralelo?
18. ¿Cómo se realiza el control de cero ohm en un óhmetro en serie?
19. ¿Es necesario observar la polaridad al medir resistencia con un óhmetro?
20. ¿Qué es un multímetro?
21. ¿Cómo puede servir un fusible casero para prevenir un incendio?
22. ¿Cuál es la finalidad fundamental de los interruptores y fusibles?
23. ¿Cómo protege la llave protectora al personal, del shock eléctrico?
24. ¿Por qué es peligroso colocar una moneda detrás de un fusible?

CAPITULO IV

Resistencia Ley de Ohm Circuitos

4-1 Introducción

En los capítulos anteriores se han expuesto diversos conceptos relativos a la electrónica, para ofrecer un cuadro general de sus fundamentos. En los capítulos siguientes se estudian con mayor detalle algunos conceptos ya tratados estableciendo los lazos que los unen.

La resistencia eléctrica, que es la oposición ofrecida por los materiales al paso de corriente eléctrica, afecta directamente la magnitud de la corriente circulante, al aplicarse la fuerza electromotriz. La relación entre corriente, tensión y resistencia en un circuito eléctrico se expresa por la ley de Ohm. Cuando se aplica dicha ley, observando a la vez el comportamiento de los circuitos eléctricos fundamentales, se puede comprender y examinar casi cualquier circuito electrónico, por más complicado que sea.

4-2 RESISTENCIA ELECTRICA

En el capítulo II se estableció que el ohm es la unidad correspondiente a la resistencia eléctrica. Georg Simon Ohm observó a través de numerosos experimentos, que cuando se aplicaba una tensión constante a varias muestras de conductores, de distintas dimensiones pero del mismo material, cada muestra tenía un flujo distinto de corriente.

De ello dedujo que la resistencia ofrecida al paso de corriente por cada muestra, no dependía solamente del tipo de material, sino también de sus dimensiones.

Esto se puede ver en la figura 4-1. El material conductor se muestra en forma prismática para facilitar la explicación, y se supone que está conectado a una batería mediante conductores que tienen resistencia nula.

Obsérvese que el eje longitudinal del material conductor es paralelo a la dirección de la corriente, y que el área transversal es perpendicular a la dirección de la misma. Si se aplica una tensión constante a los extremos de la muestra para producir un cierto flujo eléctrico, la resistencia de esta muestra es igual al cociente de la longitud por el área transversal, multiplicado por una constante llamada *resistividad* del material.

Tomando una muestra de dimensiones normalizadas (1 cm de largo, 1 cm de alto y 1 cm de espesor) la resistencia de la muestra será igual a la resistividad del material, como se ve en la siguiente expresión matemática:

$$R = \rho \times \frac{l}{A} \qquad (4\text{-}1)$$

donde:

ρ = resistividad (valor constante dependiente de la estructura molecular de la muestra)

R = resistencia de la muestra medida en ohm

l = longitud de la muestra en cm

A = sección transversal de la muestra en cm².

Sustituyendo los valores asignados a la muestra normalizada:

$$R = \rho \times \frac{1}{1}$$

Por lo tanto: $R = \rho$

El valor de ρ (letra griega que se pronuncia rho) es una constante para 1 cm³ de un material determinado, y se lo conoce como "resistividad" de ese material. Es evidente que cuanto mayor sea el número de electrones capaces de transformarse en electrones libres, tanto mayor será la corriente para cualquier valor constante de tensión.

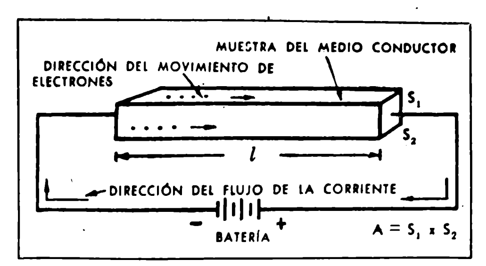


Figura 4-1. Resistividad de un conductor

De este modo, cuanto mayor sea el número de electrones libres que tiene un material, menor es la resistencia al flujo de una corriente eléctrica. El valor de ρ es diferente para cada uno de los materiales conductores que se usan en electricidad o electrónica.

Si el largo o la sección de una muestra de un material fuesen modificados, la resistencia total cambiará, pero ρ permanecerá constante. Si la tensión aplicada a una muestra se mantiene constante, mientras que el largo de la misma aumenta, la velocidad de desplazamiento de los electrones decrecerá. Esto sucede porque la velocidad de desplazamiento depende de la fuerza aplicada a las órbitas de los electrones. Como la tensión actúa sobre una mayor longitud de alambre, la fuerza aplicada a las órbitas de los electrones se ha reducido.

Como se explicó anteriormente, la corriente es proporcional a la velocidad de desplazamiento; por lo tanto, la corriente decrecerá y la resistencia aumentará, si se aumenta la longitud de la muestra. Igualmente, si se aumenta la sección transversal de un material, mientras se conservan constantes la tensión aplicada y la longitud de la muestra, habrá un número mayor de electrones que pasan por un punto dado en un segundo. Esto se traduce en un incremento de corriente. Por lo tanto, al aumentar el área de la sección del conductor, disminuye la resistencia eléctrica y aumenta el paso de corriente. Se debe recordar que la resistencia eléctrica está presente en todo circuito eléctrico, incluyendo los componentes y los alambres de conexión entre las partes del circuito.

El monto de la resistencia ofrecida por un alambre conductor es muy pequeño comparado con la resistencia total del circuito; en consecuencia, se la considera despreciable con respecto a la total del circuito. Sin embargo, la resistencia eléctrica de un conductor es de primordial importancia en el transporte de energía eléctrica a grandes distancias

Conductores de alambre

Los sistemas americano e inglés de medida de conductores de alambre expresan la longitud del conductor en pies, y el área de la sección en milésimas circulares de pulgada. A veces, la longitud se expresa en pulgadas o en mils y el área de la sección en mils cuadrados. (El mil se define como 1/1.000 de pulgada y el mil circular como el área del círculo de un mil de diámetro). En la figura 4-2 se puede comparar el mil circular y el mil cuadrado. En la práctica el mil circular se usa en lugar del mil cuadrado. En mils circulares, la sección transversal de un conductor es simplemente el cuadrado de su diámetro expresado en mils. La figura 4-2 muestras las diferencias existentes entre el área expresada en circular mils y en forma normal.

Para medir la resistencia de un conductor, deben conocerse la resistividad, la longitud y el área de la sección transversal. En las tablas, la resistividad está generalmente expresada en unidades métricas (ohm-cm). Para su uso en el sistema americano, este valor debe ser convertido en ohm por mil circular-pie. Por ejemplo, la resistividad de un alambre de cobre recocido es de 10.37 ohm por mil circular-pie, medida a la temperatura ambiente (68° Fahrenheit ó 20° grados centígrados). La tabla 4-1 da las resistividades dé varios materiales de uso común en ohm por mil circular-pie, medidas a la temperatura ambiente.

TABLA 4-1. RESISTIVIDAD EN OHM POR MIL-PIE CIRCULAR A 20° C

Material	Resistividad
Plata	9.56
Cobre (endurecido)	10.37
Aluminio	17.0
Tungsteno	34.0
Latón	42.0
Níquel	60.0
Platino	60 0
Hierro	61.0
Manganina	264.0
Constantan	294.0
Hierro forjado	436.0
Nicrom	675.0
Carbón	22,000.0

Para aplicar la tabla 4-1 en el cálculo de la resistencia de un conductor, consideremos el siguiente problema:

Un conductor de cobre de 10 pies de largo tiene

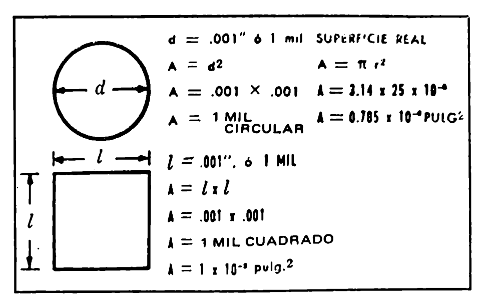


Figura 4-2. Comparación entre mil circulares y cuadrados

un diámetro de una pulgada y se usará a la temperatura ambiente; encontrar su resistencia. La resistencia puede ser hallada convirtiendo una pulgada en mils:

$$1'' = 1.000 \text{ mils}$$

Como d'' = 1'', será d'' = 1.000 mils

El área de la sección transversal en mil circulares es:

$$A = d^2$$
$$= 1000 \times 1000$$
$$A = 1 \times 10^6 \text{ mils. circulares}$$

En la tabla, $\rho = 10{,}37$ ohm por mil circular-pie para el cobre.

Substituyendo estos valores por sus símbolos respectivos en la fórmula de la resistencia (4-1):

$$R = \rho \times \frac{l}{A} = 10{,}37 \times \frac{10}{1 \times 10^6}; \text{ pero } \frac{1}{10^6} = 10^{-6}$$

Por lo tanto:

$$R = 10{,}37 \times 10 \times 10^{-6}$$

$R = 103{,}7 \times 10^{-6}$ ohm $= 0{,}0001037\ \Omega = 103{,}7$ micro ohm que es una resistencia muy pequeña.

Nota:

1 pie = 30,48 cm 1 pulgada = **2,54 cm**

Resolvamos un ejemplo en unidades métricas. Sea un conductor de cobre de 628 m de largo y dos milímetros de diámetro. ρ es 0,017. Calcular R.

$$R = \rho . \frac{l}{A} = \rho \left(\Omega . \frac{mm^2}{m}\right) . \frac{l(m)}{A(mm^2)}$$

siendo $A = \pi r^2$

será $A = 6{,}28\ A\ 1^2 = 6{,}28$

luego $R = 0{,}017 . \frac{628}{6{,}28} = 0{,}017 \times 100 = 1{,}7\ \Omega$

$R = 1{,}7\ \Omega$

El cobre, conductor de primera clase

El hecho de que el cobre sea usado como material conductor en la mayoría de los casos es debi-

do, no sólo a su baja resistividad (tabla 4-1) y costo comparativamente bajo, sino también a la excelencia de sus características físicas en general. El cobre presenta una gran resistencia a la tracción (capacidad de resistir tensiones o tirones sin cortarse), está relativamente libre de la corrosión atmosférica, y es fácilmente soldable.

La plata tiene la más baja resistividad de todos los metales conocidos pero, debido a su alto costo de producción, se la usa solamente en aplicaciones limitadas, donde el costo es de importancia secundaria. La plata se usa en algunos instrumentos para mediciones de precisión y en líneas experimentales de baja pérdida. Dado su bajo peso, el aluminio es el principal competidor del cobre para el uso en líneas de transmisión de alta tensión.

Como el cobre es utilizado casi exclusivamente como material conductor de electricidad, se lo considera como el "conductor normal". Esto hace que la resistencia de los materiales se exprese a veces en términos de relación de su resistencia con respecto a la del cobre, lo que se conoce con el nombre de *resistencia relativa* del material.

En la lista de la tabla 4-2 se tienen las resistencias relativas de algunos materiales comunes.

La tabla 4-2 da también las conductancias relativas de varios materiales, usando como base la conductancia del cobre. Al hablar de conductores y aisladores se mencionó brevemente que la capacidad de un material de dejar pasar una corriente eléctrica, se denomina conductividad del material. La conductancia es la medida de la conductividad, y se define como "la recíproca de la resistencia". La unidad de conductancia es el *mho,* que es la palabra *Ohm,* escrita al revés. La ecuación para determinar la conductancia (G) es una variación de la ecuación vista para determinar resistencia.

TABLA 4-2 RESISTENCIAS Y CONDUCTANCIAS RELATIVAS DE ALGUNOS MATERIALES COMUNES

Material	Resistencia relativa	Conductancia relativa
Plata	0.92	1.08
Cobre	1.00	1.00
Oro	1.38	0.725
Aluminio	1.59	0.629
Tungsteno	3.20	0.312
Zinc	3.62	0.275
Latón	4.40	0.227
Platino	5.80	0.172
Hierro	6.67	0.149
Níquel	7.73	0.129
Hojalata	8.20	0.121
Acero	8.62	0.116
Plomo	12.76	0.081
Manganina	26.0	0.0385
Mercurio	54.60	0.018
Nicrom	60.00	0.0166
Carbón	2030.00	0.0004

Resistencia — *Conductancia*

$$R = \rho \times \frac{l}{A} \qquad G = r \times \frac{A}{l} \quad (4\text{-}2)$$

$$\text{Como } R = \frac{1}{G}$$

G = conductancia en mho.

$r = \frac{1}{\rho}$ la recíproca de la resistividad

Es evidente que cuanto menor es la resistencia de un conductor, mayor es la conductancia o conductividad.

Dimensiones normalizadas de los conductores de cobre

La norma americana de calibres de alambre (American Wire Gauge - AWG) antes denominada Brown and Sharpe (B & S) es la norma de calibración de conductores en trabajos eléctricos y electrónicos.

En las normas para fabricación americana de conductores, los diámetros de los mismos son tales que la relación de un diámetro al siguiente es constante. Esta calibración ha sido establecida como base para la especificación de tamaños (y por lo tanto en cualidades resistivas) de los conductores de cobre usados en las industrias eléctricas y electrónicas. Al mayor tamaño de alambre, que es el N° 0000, se le ha asignado un diámetro de 460 mils y al menor, N° 40, un diámetro de 3,145 mils; entre estos dos tamaños, hay otros 43.

Si se consulta la tabla de diámetros dada en 4-3, se puede ver que el mayor alambre macizo de sección transversal circular, de uso más común, es el N° 0000. El alambre N° 0000 tiene un diámetro de cerca de ½ pulgada, y una sección de cerca de 1/6 de pulgada cuadrada. Los conductores de cobre macizo de mayor sección y mayor capacidad, como los requeridos para las barras colectoras, son generalmente de sección rectangular, debido a la mayor facilidad para curvarlos, fijarlos y soldarlos.

Cuando se requieren conductores de mayor tamaño que el N° 0000, se usan siempre cables de alambres retorcidos (trenzados), debido a su gran fle-

TABLA 4-3 TABLA DE CALIBRES (B & S) PARA ALAMBRE DE COBRE ENDURECIDO

Calibre Nº	Diámetro en mils. a 20° C	Sección transversal a 20° C		Ohms por 1000 pies		Capacidad de corriente permisible	
		Mils circulares	Pulgadas²	0°C (32°F)	20°C (68°F)	Aislante de goma	Otro aislante
0000	460.0	211,600.0	0.1662	0.04516	0.04901	225	325
000	409.6	167,800.0	0.1318	0.05695	0.06180	175	275
00	364.8	133,100.0	0.1045	0.07181	0.07793	150	225
0	324.9	105,500.0	0.08289	0.09055	0.09827	125	200
1	289.3	83,690.0	0.06573	0.1142	0.1239	100	150
2	257.6	66,370.0	0.05213	0.1440	0.1563	90	125
3	229.4	52,640.0	0.04134	0.1816	0.1970		
4	204.3	41,740.0	0.03278	0.2289	0.2485	70	90
5	181.9	33,100.0	0.02600	0.2887	0.3133		
6	162.0	26,250.0	0.02062	0.3640	0.3951	50	70
7	144.3	20,820.0	0.01635	0.4590	0.4982		
8	128.5	16,510.0	0.01297	0.5788	0.6282	35	50
9	114.4	13,090.0	0.01028	0.7299	0.7921		
10	101.9	10,380.0	0.008155	0.9203	0.9989	25	30
11	90.74	8,234.0	0.006467	1.161	1.260		
12	80.81	6,530.0	0.005129	1.463	1.588	20	25
13	71.96	5,178.0	0.004067	1.845	2.003		
14	64.08	4,107.0	0.003225	2.327	2.525	15	20
15	57.07	3,257.0	0.002558	2.934	3.184		
16	50.82	2,583.0	0.002028	3.700	4.016	6	10
17	45.26	2,048.0	0.001609	4.666	5.064		
18	40.30	1,624.0	0.001276	5.883	6.385	3	5
19	35.89	1,288.0	0.001012	7.418	8.051		
20	31.96	1,022.0	0.0008023	9.355	10.15		
21	28.45	810.1	0.0006363	11.80	12.80		
22	25.35	642.4	0.0005046	14.87	16.14		
23	22.57	509.5	0.0004002	18.76	20.36		
24	20.10	404.0	0.0003173	23.65	25.67		
25	17.90	320.4	0.0002517	29.82	32.37		
26	15.94	254.1	0.0001996	37.61	40.81		
27	14.20	201.5	0.0001583	47.42	51.47		
28	12.64	159.8	0.0001225	59.80	64.90		
29	11.26	126.7	0.00009953	75.40	81.83		
30	10.03	100.5	0.00007894	95.08	103.2		
31	8.928	79.70	0.00006260	119.9	130.1		
32	7.950	63.21	0.00004964	151.2	164.1		
33	7.080	50.13	0.00003937	190.6	206.9		
34	6.305	39.75	0.00003122	240.4	260.9		
35	5.615	31.52	0.00002476	303.1	329.0		
36	5.000	25.00	0.00001964	382.2	414.8		
37	4.453	19.83	0.00001557	482.0	523.1		
38	3.965	15.72	0.00001235	607.8	659.6		
39	3.531	12.47	0.000009793	766.4	831.8		
40	3.145	9.888	0.000007766	966.5	1049.0		

xibilidad. En tales casos, el tamaño se expresa directamente en "mils" circulares. También se utilizan cables trenzados de sección menor que el Nº 0000, y ello también ocurre en los casos en que la flexibilidad es esencial. Además de los factores de tamaño y diámetro, la resistencia del alambre —por millar de pies de longitud— es de importancia para el diseño y manufactura de los equipos eléctricos.

Debe observarse que a menor diámetro y sección transversales, es mayor la resistencia del alambre por cada mil pies de longitud.

La tabla 4-3 revela una importante característica del cobre: la resistencia del cobre aumenta con el aumento de temperatura. La tabla da dos valores de resistencia por cada mil pies de conductores de distinto diámetro. La diferencia entre los valores depende solamente de la temperatura del material. El cobre no es el único material sujeto a cambios de resistencia por el cambio de la temperatura.

Todos los materiales están sujetos a este efecto en algún grado. Generalmente, cuanto mayor es la temperatura del material, tanto mayor es su resistencia, como en el caso del cobre; sin embargo, hay unos pocos materiales cuya resistencia disminuye cuando se calientan. Para cada material, el cambio de resistencia por ohm, por grado de diferencia de temperatura, a partir de una temperatura inicial específica, se denomina *coeficiente de temperatura* del material. Este coeficiente de temperatura es entonces una relación entre el cambio de temperatura y el cambio de resistencia de cualquier material específico. Se dice que un material cuya resistencia aumenta al aumentar su temperatura, tiene un coeficiente de temperatura *positivo*, mientras que un material cuya resistencia disminuye al aumentar la temperatura, tiene coeficiente de temperatura *negativo*, como el carbón. Los coeficientes de temperatura y resistividad de los materiales pueden obtenerse en las tablas de cualquier manual de ingeniería, cuando hay necesidad de medir o calcular el cambio de la resistencia de algún material. La fórmula siguiente se usa para calcular la resistencia de un conductor de alambre que ha sido sometido a un cambio de temperatura.

$$R = R_0 (1 + at)$$

donde:

- R = Resistencia de un alambre en ohm, a su temperatura final de t°C.
- R_0 = Resistencia del alambre en ohm a una temperatura de 0°C.
- a = Coeficiente de temperatura de resistencia del material a 0°C.
- t = Temperatura final del alambre, en grados centígrados.

Por ejemplo, si se supone que una bobina de alambre de cobre tiene una resistencia de 100 ohm y un coeficiente de temperatura de resistencia de 0,00427 a 0°C, con la ecuación precedente se halla la resistencia del conductor a 40°C de la siguiente forma:

$$R = R_o (1 + at)$$

Sustituyendo los valores dados:

$$R = 100 (1 + 0{,}00427 \times 40)$$

o sea: $R = 100 (1+0{,}00427 \times 40) - 100 \times 1{,}17$

y finalmente: $R - 117$ ohm

Varias aleaciones metálicas exhiben numerosas características interesantes, especialmente con respecto a los coeficientes de temperatura y resistividad. La producción de alambres de esas aleaciones está de acuerdo en lo que respecta a calibres y diámetros con la American Were Gauge. La manganina, por ejemplo, que es una aleación de 84% de manganeso, 4% de níquel, y 12% de cobre, tiene un coeficiente de temperatura muy bajo (0,000006). Esto lo hace muy útil para la construcción de instrumentos de medida y sus accesorios, de cuya constancia de resistencia, independiente del calentamiento por efectos de la corriente, depende la precisión del aparato.

El siguiente ejemplo ilustra el uso de las tablas 4-2 y 4-3, en la determinación de la cantidad de alambre necesaria para efectuar un trabajo específico, en relación adecuada con la resistencia y capacidad de corriente a circular.

Ejemplo: Es necesario obtener una resistencia que tenga una tolerancia estricta de 1,28 ohm para un circuito de medida. El material de que se dispone es un trozo de alambre de manganina esmaltado, Nº 31. ¿Qué longitud de dicho alambre hace falta?

En la tabla 4-3 vemos que a 20° centígrados, el alambre de cobre Nº 31 tiene una resistencia de 130,1 ohm cada 1.000 pies; y de la tabla 4-2 deducimos que la manganina tiene una resistencia relativa igual a 26 veces la del cobre; por lo tanto, usando esta información, la longitud del alambre de manganina requerido se calcula como sigue:

Si 1.000 pies de alambre de cobre Nº 31 tienen una resistencia de 130,1 ohm, 1.000 pies de alambre de manganina Nº 31 tendrán una resistencia de:

$$26 \times 130 = 3380 \text{ ohm}$$

Con estos datos se forma la siguiente proporción:

Si la resistencia de 1000 pies de alambre manganina Nº 31 = 3380 ohm, la resistencia de X pies de alambre manganina Nº 31 = 1,28 ohm.

En forma de ecuación algebraica será:

$$\frac{1000}{x} = \frac{3380}{1{,}28}$$

Multiplicando medios y extremos:

$$3380\,x = 1280$$

$$x = \frac{1280}{3380}$$

$x = 0{,}377$ pies o sea 4,5 pulgadas, o sea 11,5 cm

Luego vemos que 4,5 pulgadas de alambre de manganina Nº 31 producen una resistencia de 1,28 ohm, o sea la cantidad necesaria.

Resistores

Los resistores son los elementos de un circuito eléctrico diseñados para producir oposición a la corriente en dicho circuito. Del estudio de las listas de diámetros de alambre de la tabla 4-3 y de las resistividades de los conductores de la tabla 4-2, resulta evidente que el uso de alambre

para resistores requeriría grandes cantidades para proveer a un circuito de una resistencia relativamente elevada. En la tabla 4-2 vemos que el carbón tiene una resistividad 2030 veces mayor que la del cobre. (En realidad, la resistividad relativa del carbón puede variar desde 400 hasta 2400 según el estado molecular del material). Debido a su alta resistividad, el carbón se usa como la principal materia prima para la fabricación de resistores fijos y variables.

Clasificación de los resistores

Los resistores pueden clasificarse comercialmente en dos grupos: resistores de alambre arrollado y de composición. Esta clasificación depende de los materiales usados en su fabricación. Los resistores de alambre devanado se usan generalmente cuando se emplean corrientes de gran intensidad. Sin embargo, se usan también cuando se necesitan valores medidos con una tolerancia de más o menos 1 % como, por ejemplo, para prueba de equipos. También tienen aplicación donde existen corrientes más bien pequeñas, pero que requieren gran resistencia. Los valores que deberán tenerse en cuenta en la fabricación de resistores de alambre devanado surgen de la misma explicación dada para la determinación de la resistividad de los conductores de alambre. La forma exterior de los diversos tipos de resistores de alambre devanado puede estudiarse en base a lo tratado acerca de las partes electrónicas en la sección 2-7.

Los resistores de composición se construyen usando carbón pulverizado mezclado con un aglutinante. Mediante este proceso, pueden fabricarse económicamente resistencias de alto valor óhmico. Los resistores de composición de diversos valores se construyen cambiando simplemente la proporción del aglutinante y del carbón, lo que varía, en consecuencia, la resistencia por cm. Si se recortan varios trozos de distintos largos y diámetros de la mezcla, pueden confeccionarse resistores de varios valores óhmicos y distintas potencias de disipación.

Los resistores de carbón no pueden construirse con tanta precisión como los resistores de alambre, debido a las posibles variaciones en los materiales usados. Por eso, los resistores de carbón no se utilizan en circuitos donde son necesarios valores de tolerancias estrictas.

Código de colores para resistores

Debido a que en la aplicación práctica la electrónica se torna cada día más compleja, se hizo necesario normalizar ciertas prácticas. El desarrollo de los códigos de colores para los diferentes valores de resistores usados en electrónica fue el primer paso en esta dirección. Desde que el diseño práctico demandó resistores de forma tubular, el uso de valores numéricos en las resistores se hizo muy dificultoso, a menos que el valor numérico de la resistencia fuera colocado a su alrededor, lo que no se consideró práctico. Como resultado, surgieron los anillos de identificación de distintos colores, dispuestos de manera de formar un código de colores, con equivalencia numérica. La tabla 4-4 presenta el código de colores utilizado para identificar los valores de los resistores.

TABLA 4-4. CÓDIGO DE COLORES DE RESISTORES

Color	1er dígito	2do dígito	Multiplicador	Tolerancia (%)
Negro	0	0	1	
Marrón	1	1	10	
Rojo	2	2	100	
Anaranjado	3	3	1,000	
Amarillo	4	4	10,000	
Verde	5	5	100,000	
Azul	6	6	1,000,000	
Violeta	7	7	10,000,000	
Gris	8	8	100,000,000	
Blanco	9	9	1,000,000,000	
Dorado			.1	5
Plateado			.01	10
Incoloro				20

En el desarrollo de los códigos de colores, la forma de codificación actual pasó primero por varias etapas de evolución. La primera forma de código de colores fue llamada "sistema de tilde". Como el nombre lo indica, un color cubría el cuerpo del resistor, otro color se aplicaba a un extremo (a veces a ambos), y el tercer color aparecía como un tilde en el centro del resistor. Los tres colores representaban las *cifras significativas*. El color del cuerpo indica la primera cifra; el color del extremo, la segunda cifra; y el color del tilde, la tercera cifra. Esta tercera cifra significa el número de ceros (potencias de 10) a agregar a continuación de la primera y segunda cifras significativas. Debido a su función, la tercera cifra se llama *número multiplicador*.

Como el proceso de normalización del código de colores continuó, el "sistema de tilde" pasó de

moda. La Asociación de Fabricantes de Aparatos de Radio (R.M.A.), ahora llamada Asociación de Industrias Electrónicas (E.I.A.), adoptó el sistema actual "cuatro bandas" como código de colores. En este sistema, los colores están en forma de anillos, o bandas contiguas, en un extremo del resistor. El valor de resistencia en onm se determina leyendo las bandas de colores desde el extremo hacia el centro del resistor. La primera banda de color indica el valor del primer dígito; la segunda, el valor del segundo; la tercera, el multiplicador o número de ceros que hay que agregar al primero y segundo dígito para obtener la resistencia total, y la cuarta banda indica la tolerancia.

En algunos circuitos electrónicos, pueden permitirse ciertas tolerancias en los valores de la resistencia, sin afectar mayormente el rendimiento de los mismos. Por esta causa, los resistores de circuitos no críticos pueden tener una tolerancia (variación) de hasta un 20 %. En otros circuitos electrónicos, más delicados por naturaleza, se requieren resistores con tolerancia mucho más estricta. Este hecho llevó a la adopción de dos colores adicionales, utilizados en la cuarta banda, para indicar el porcentaje de tolerancia de la resistencia dentro de los valores codificados. La tabla 4-4 muestra los colores dorado y plateado, colocados en la cuarta franja, para indicar la tolerancia. El código completo (sistema de 4 bandas) para un resistor de 100.000 ohm de carbón, con ± 5 % de tolerancia, se aplicaría de la siguiente forma, partiendo desde un extremo hacia el centro: marrón, negro, amarillo y dorado. El valor de la resistencia estará entre los límites 95.000 y 105.000 ohm, dado que la tolerancia es de ± 5 %. La correlación entre color y número, según la tabla 4-4 tiene aceptación universal, y es el código normal para todos los elementos que llevan código de colores para la determinación de su valor.

4-3 LEY DE OHM

Una de las más importantes leyes de la electricidad y la electrónica, es la enunciada en base a los resultados experimentales obtenidos por Georg Simon Ohm. Este enunciado expresa la relación fundamental entre tensión, corriente y resistencia en un circuito. Se llama Ley de Ohm y expresa:

La corriente que fluye por un circuito eléctrico es directamente proporcional a la tensión e inversamente proporcional a la resistencia.

La ley de Ohm, expresada en forma de ecuación matemática, es:

$$I = \frac{E}{R} \qquad (4\text{-}4)$$

Donde:

I = Corriente en ampere
E = Tensión en volt
R = Resistencia en ohm

El enunciado de la ley de Ohm estaba basado originalmente en la acción de la tensión, corriente y resistencia en un circuito eléctrico alimentado por una fuente de corriente continua. La figura 4-3 presenta un circuito eléctrico simple, similar a los circuitos mostrados anteriormente. Nótese que un circuito eléctrico no funcionará si no hay un camino completo para el flujo de corriente, desde una fuente de fuerza electromotriz, a través de un circuito externo, hasta el otro borne de la fuente. En el circuito de la figura 4-3 la corriente fluirá en la dirección indicada, procedente del terminal negativo de la batería, a través de la pequeña resistencia del amperímetro y de la resistencia de 10 ohm, hasta el terminal positivo de la batería.

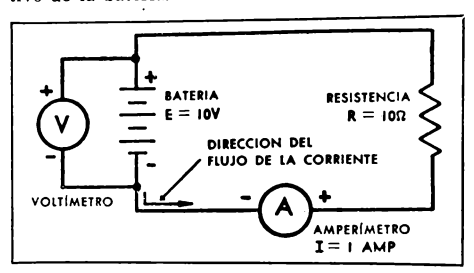


Figura 4-3. Sencillo circuito eléctrico

Los valores presentados en la figura 4-3 servirán para ilustrar las relaciones expresadas por la ley de Ohm. Se supone que el voltímetro indica 10 volt y que los colores de la resistencia son: marrón, negro, negro (resistencia de 10 ohm). Se desea, con estos datos, calcular el valor de la corriente que fluye por el circuito. Usando la ley de Ohm, se puede calcular la corriente total del circuito, reemplazando el valor de tensión E y la resistencia R en la fórmula.

$$I = \frac{E}{R}$$

$$= \frac{10 \text{ volt}}{10 \text{ ohm}}$$

$$I = 1 \text{ ampere}$$

Mediante la ley de Ohm, se calculó que el flujo de corriente a través del circuito es el mismo que el indicado en el amperímetro. Por lo tanto, la ley de Ohm puede usarse para el cálculo de la

intensidad circulante por un circuito, sin necesidad de intercalar un amperímetro dentro del mismo.

La ecuación básica de la ley de Ohm, $I = \frac{E}{R}$, puede expresarse algebraicamente transponiendo términos, en forma de obtener tensión o resistencia.

Las tres expresiones de la ley de Ohm así obtenidas son:

$I = \frac{E}{R}$ o sea: la intensidad es igual a la tensión dividida por la resistencia.

$R = \frac{E}{I}$ o sea: la resistencia es igual a la tensión dividida por la intensidad.

$E = R \times I$ o sea: la tensión es igual a la corriente multiplicada por la resistencia.

Deben comprenderse y memorizarse las fórmulas para resolver problemas utilizando la ley de Ohm. En la figura 4-4 se ofrece una sencilla regla para memorizar esta fórmula. El método del círculo es fácil de recordar. Si se cubre E se observa que I y R están lado a lado, indicando de este modo que es necesario multiplicar estos dos últimos valores para hallar E. Si se cubre I, vemos que E está sobre R, indicando esto que es necesario dividir ambos términos para hallar el valor pedido de I. Similarmente, cubriendo R, vemos que E está encima de I, indicando esto que para hallar el valor de R hay que dividir E por I.

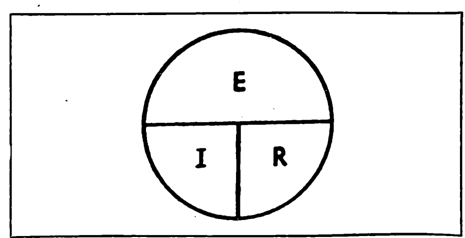
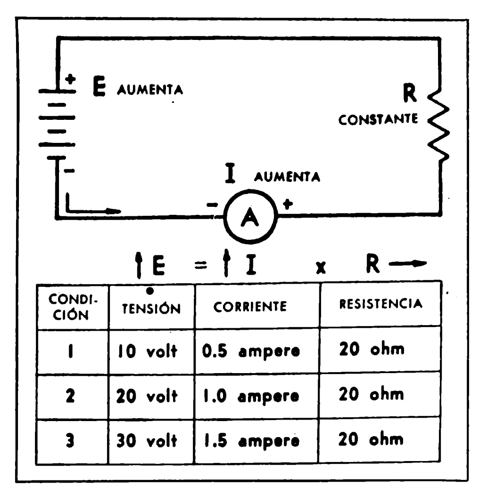


Figura 4-4. Círculo para memorizar las fórmulas de la ley de Ohm

Relaciones asociadas con la ley de Ohm

De las tres expresiones posibles de la ley de Ohm se toma la ecuación $E = I \times R$ para examinarla en los párrafos siguientes y mostrar las relaciones de tensión, corriente y resistencia. Además de ser útil para la determinación de una magnitud cuando se dispone de las otras dos, la ley de Ohm destaca el efecto de la variación de



CONDICIÓN	TENSIÓN	CORRIENTE	RESISTENCIA
1	10 volt	0.5 ampere	20 ohm
2	20 volt	1.0 ampere	20 ohm
3	30 volt	1.5 ampere	20 ohm

Figura 4-5. Efecto en la corriente cuando se varía la tensión a través de una resistencia constante

una de las magnitudes con respecto a la variación de la otra, cuando la tercera magnitud permanece constante.

Efecto del aumento de tensión

La figura 4-5 presenta un circuito fundamental junto con una tabla que indica los valores del circuito, para tres diferentes condiciones. En las tres condiciones, la resistencia se mantiene constante y la tensión se aumenta en 10 volt por vez. Comparando la condición uno con la condición dos, se observa que, duplicando la tensión se duplica la intensidad de corriente circulante, mientras la resistencia permanece invariable. Además, comparando la condición tres con la dos, se puede observar que, aumentando la tensión en la mitad del valor anterior, la intensidad también aumenta la mitad de su valor anterior.

De este análisis resulta evidente que si la resistencia de cualquier circuito se mantiene constante y la tensión se incrementa (positiva o negativamente), la corriente variará en proporción directa al incremento de tensión.

Efecto del incremento de resistencia

La figura 4-6 es similar a la 4-5, salvo que se varía la resistencia, y la tensión del circuito permanece constante. Si se observa la tabla de la figura 4-6, y se compara las condiciones uno y dos, se puede ver que, con la misma tensión aplicada y duplicando la resistencia en el circuito, se re-

duce la corriente a la mitad del valor original. Similarmente, comparando la condición tres con la uno, se puede ver que, con la misma tensión aplicada, y triplicando la resistencia, se reduce la corriente a la tercera parte de su valor original. De los valores dados en la tabla (la cual puede verificarse mediante la aplicación de la ley de Ohm), se saca en conclusión que si en un circuito la tensión se mantiene constante y se aumenta la resistencia, la corriente decrecerá en un valor proporcional al incremento de la resistencia. Por consiguiente, en un circuito eléctrico, la corriente es inversamente proporcional a la resistencia.

Efecto del incremento de corriente

Según se demostró antes, cambiando la tensión (a resistencia constante), o la resistencia (a tensión constante), se obtiene un cambio proporcional de corriente, ya sea directa o inversamente proporcional. Es imposible cambiar el flujo de corriente en un circuito sin afectar primero, ya sea la tensión o la resistencia. No obstante, consideremos una parte componente de un circuito a través de la cual circula una corriente constante y desarrolla una tensión constante a través de la misma: ($E = I \times R$). Si la corriente aumentara, debe presumirse que, o disminuyó la resistencia, o aumentó la tensión aplicada a esa parte. Se puede, entonces, llegar a la conclusión de que a mayor corriente circulante a través de un resistor, mayor es la tensión aplicada al mismo. La tensión aplicada al resistor o a cualquier otro elemento, se designa a menudo, como *caída de potencial* a través del elemento. La caída de tensión es igual a la diferencia de potencial requerida para producir esa corriente a través de la parte de circuito que estamos considerando.

4-4 RESUMEN DE LA LEY DE OHM

Si volvemos sobre los principios básicos de la ley de Ohm, se apreciará que está basada en las relaciones existentes entre tensión, corriente y resistencia en un circuito eléctrico. Los símbolos correspondientes a la ley de Ohm, son: E, para tensión, I para intensidad, y R para resistencia. Las relaciones existentes entre estas tres magnitudes son:

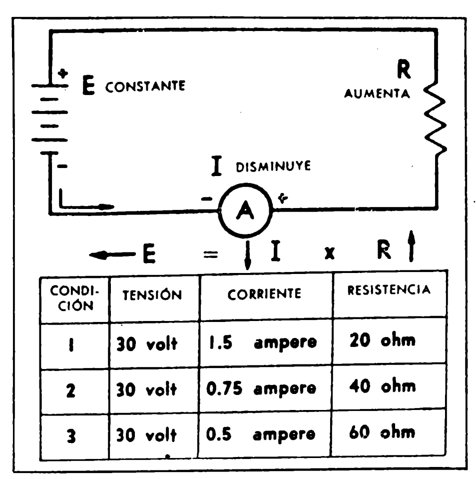
Para deducir la intensidad: $I = \dfrac{E}{R}$

Para hallar la resistencia: $R = \dfrac{E}{I}$

Para hallar la tensión: $E = R \times I$

Las magnitudes en juego en las relaciones dadas se expresan en sus correspondientes unidades básicas: ampere, ohm y volt respectivamente.

De la expresión $E = R \times I$ se pueden derivar las siguientes relaciones:



CONDICIÓN	TENSIÓN	CORRIENTE	RESISTENCIA
1	30 volt	1.5 ampere	20 ohm
2	30 volt	0.75 ampere	40 ohm
3	30 volt	0.5 ampere	60 ohm

Figura 4-6. Efecto sobre la corriente cuando se varía la resistencia y se mantiene la tensión constante

1) Si se aumenta la tensión y la resistencia se mantiene constante, la corriente aumentará.

2) Si se disminuye la tensión y la resistencia se mantiene constante, la corriente decrecerá.

3) Si se disminuye la resistencia y la tensión es mantenida constante, la corriente aumentará.

4) Si es aumentada la resistencia y la tensión se mantiene constante, la corriente disminuirá.

5) Puede determinarse la caída de tensión a través de una parte del circuito, si se conoce el valor de la corriente a través del mismo y su resistencia.

4-5 CIRCUITOS ELÉCTRICOS

Como se estableció anteriormente, un circuito eléctrico es un camino, o agrupación de caminos, en que pueden circular corrientes eléctricas. Los tres tipos fundamentales de circuitos eléctricos se denominan: circuito en serie, en paralelo y en serie-paralelo. Los circuitos pueden ser muy sencillos o muy complicados. Con el conocimiento de las características de los circuitos en serie, en paralelo y en serie-paralelo, y de la ley de Ohm, se puede tener una clara visión de lo explicado hasta ahora, y obtener valores de los circuitos experimentados.

Precauciones que deben observarse cuando se trabaja con circuitos eléctricos

Cuando se trabaja en un circuito eléctrico, se deben tomar precauciones. Todo circuito eléctrico debe ser tratado y manipulado teniendo siempre

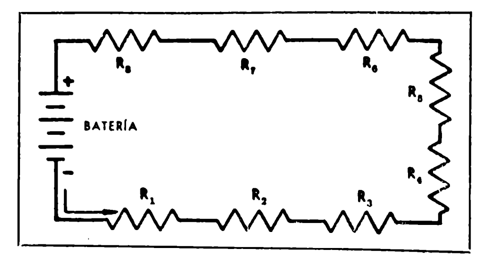


Figura 4-7. Diagrama esquemático de un circuito resistivo, equivalente a lámparas conectadas en serie

presente que puede ser peligroso. El cuerpo humano ofrece una cierta resistencia al paso de la corriente, pero a pesar de ello es un buen conductor. Nunca debe permitirse que alguna parte del cuerpo tome contacto con una diferencia de potencial, pues el cuerpo completará un paso para el flujo de corriente. Los *potenciales positivos* son tan peligrosos como los *negativos.* Siempre se debe desconectar la f.e.m. de cualquier circuito antes de cambiar cualquier elemento o de conectar algún instrumento de medida. Cuando es necesario efectuar mediciones en un circuito en funcionamiento, se debe determinar dónde están los polos positivo y negativo, para asegurarse de que no se establece ningún contacto físico con el cuerpo del operador.

Si se siguen estas pocas sugerencias, de acuerdo con las precauciones usadas en el laboratorio, no se producirán daños causados por shock eléctrico.

Circuitos eléctricos en serie

Un circuito eléctrico en serie es el que suministra energía eléctrica a una o varias partes o aparatos conectados de manera tal que la corriente pase a través de cada uno de ellos sucesivamente, hasta volver a la fuente de F.E.M.

Un sencillo circuito en serie, que muchos pueden conocer, es un viejo sistema de iluminación para arbolitos de Navidad, en el cual, si una lámpara se quema, se apagan todas. En la figura 4-7. se ve un circuito análogo al mencionado; las lámparas están representadas por resistencias equivalentes a las suyas, y el enchufe está reemplazado por una batería. Es notorio que si se produce una ruptura en el cable de conexión, o en cualquiera de los filamentos, el circuito quedará interrumpido.

Caída de tensión en un circuito eléctrico

El término *"caída de tensión"* ha sido definido como la diferencia de potencial desarrollada entre dos puntos de un circuito eléctrico (el producto de la corriente circulante a través del circuito por la resistencia del mismo). En todos los circuitos presentados hasta ahora en este texto, se muestra una batería como fuente de energía eléc-

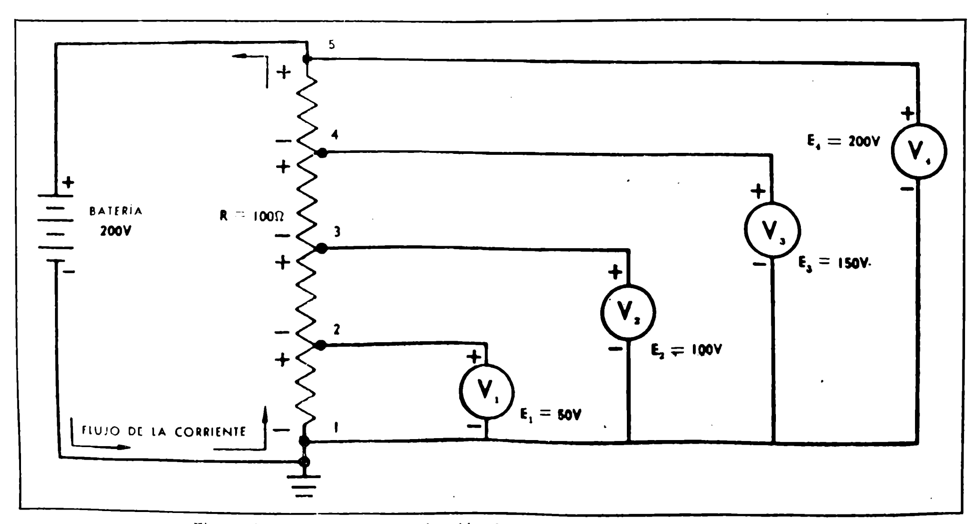


Figura 4-8. Aumento y disminución del potencial en un circuito eléctrico

trica, puesto que es representativa de una fuente de C.C.

En la figura 4-8 se ha colocado un resistor (R) graduable de 100 ohm entre los terminales de una batería, completando el circuito eléctrico. Éste resulta un simple circuito en serie porque la corriente de la batería tiene solamente un camino a seguir. El resistor R tiene impresos 200 volt, y también el valor de 100 ohm. La corriente que la atraviesa puede ser calculada mediante la ley de Ohm:

$$I = \frac{E}{R}$$
$$= \frac{200\ V}{100\ \Omega}$$
$$I = 2 \text{ ampere}$$

Para ilustrar las características de la tensión en un circuito en serie, puede medirse su valor en pasos, como indica la figura. Todas las mediciones se toman con respecto a tierra, o a un punto común de referencia, con potencial cero. El voltímetro V_1 está colocado a través de la porción inferior del resistor, entre el punto 2 y el punto 1 (tierra), e indica una porción de la tensión total aplicada al resistor. El voltímetro indica 50 volt; luego, ha ocurrido una caída de tensión debido al paso de la corriente a través de esta porción del resistor. Calculada previamente la corriente del circuito en 2 ampere, y medida la tensión (50 volt), podrá calcularse la resistencia existente entre tierra y el punto 2, puesto que dos de las tres magnitudes de la ley de Ohm son conocidas:

$$R = \frac{E}{I}.$$
$$= \frac{50 \text{ volts}}{2 \text{ amp.}}$$
$$R = 25 \text{ ohms}$$

Si se observan los valores de tensión indicados en los voltímetros V_2, V_3 y V_4, se puede ver que hay una caída de tensión de 50 volt entre los bornes del resistor.. Por ejemplo, la tensión medida en el punto 3 es de 100 volt y el potencial del punto 4 es de 150 volt, lo cual indica que ha habido una caída de tensión de 50 volt entre el punto 4 y el punto 3. Por eso, la resistencia entre dos derivaciones adyacentes (del resistor debe ser 25 Ω, para producir una caída total de 50 volt entre los terminales del resistor.

La energía eléctrica producida por la batería se consume en la resistencia, o sea que la energía eléctrica se convierte en energía térmica, a medida que la corriente fluye a través de una resistencia. Mientras que la fuente entregue energía eléctrica a medida que es consumida, la diferencia de potencial entre los extremos del resistor del circuito permanecerá constante. La diferencia de potencial o caída de tensión a través de cada resistencia permanecerá constante hasta que la energía química de la batería se haya utilizado totalmente, o se altere el circuito.

Lo establecido anteriormente representa una transformación de energía, y es menester que se entienda bien para evitar la posible impresión de que la tensión se destruye. Debe recordarse que la tensión o diferencia de potencial es una medida de la cantidad de trabajo requerida para mover una carga unitaria de un punto a otro; y que una caída de tensión a través de cualquier elemento electrónico se produce sólo por efecto de la fuente de energía eléctrica.

Tensión, corriente y resistencia efectiva en un circuito en serie

En lo expuesto anteriormente acerca de la caída de tensión en un circuito eléctrico, fue necesario seguir la dirección del flujo de corriente a través de la resistencia para establecer la polaridad de la caída de tensión (producida a través de la resistencia). Un rasgo distintivo de los circuitos en serie es el hecho de que la intensidad total del circuito es la misma en toda su extensión.

En la figura 4-8 hay sólo un elemento del circuito, y éste está dividido en cuatro secciones iguales, de manera que pueden medirse las caídas de tensión. Los mismos resultados pueden obtenerse en cuatro resistores separados de 25 ohm cada uno, según se aprecia en la figura 4-9.

Una comparación de las figuras 4-8 y 4-9 revela otro rasgo distintivo de un circuito en serie: nominalmente, la resistencia total del mismo es la suma de las resistencias parciales. Si se usa la figura 4-10 para ilustrar mejor este hecho; la resistencia total del circuito se obtiene mediante una suma:

$$R_t = R_1 + R_2 + R_3$$
$$= 3\Omega + 6\Omega + 3\Omega$$
$$R_t = 12 \text{ ohm} \qquad (4\text{-}5)$$

Para confirmar el valor obtenido mediante esta suma, se puede aplicar la ley de Ohm al circuito total, puesto que se tienen los valores de tensión (E) y corriente (I).

$$R = \frac{E}{I}$$
$$= \frac{24\ V}{2 \text{ amp}}$$
$$R = 12 \text{ ohm}$$

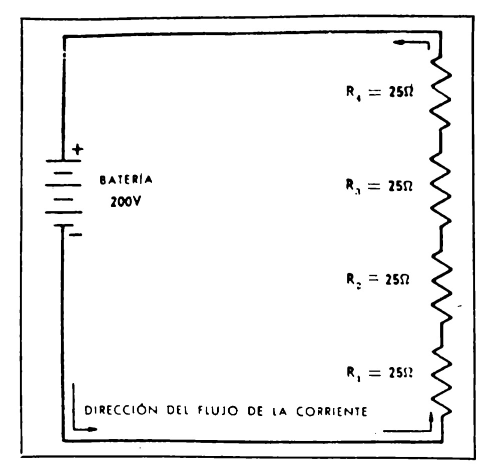


Figura 4-9. Circuito equivalente al de la figura 4-8 utilizando componentes separados

De este modo, puede verse que el cálculo basado en la ley de Ohm confirma con su resultado coincidente el método de adición directa de las resistencias individuales (para obtener la resistencia total del circuito en serie).

Una tercera característica de los circuitos en serie es que la tensión total aplicada al circuito es igual a la suma de las caídas de tensión a través de las partes de dicho circuito. Con la ayuda de la figura 4-10, se puede probar este hecho. Mediante el uso de la ley de Ohm pueden calcularse las caídas parciales de tensión del circuito como se indica a continuación. (Obsérvese el método usado para representar la tensión a través de una resistencia específica):

$E_{R_1} = I \times R_1$; $E_{R_1} = 2 \text{ amp} \times 3\ \Omega$; $E_{R_1} = 6$ volt
$E_{R_2} = I \times R_2$; $E_{R_2} = 2 \text{ amp} \times 6\ \Omega$; $E_{R_2} = 12$ volt
$E_{R_3} = I \times R_3$; $E_{R_3} = 2 \text{ amp} \times 3\ \Omega$; $E_{R_3} = 6$ volt

Combinando las tres caídas de tensión, se puede hallar la tensión total aplicada.

$$E_t = E_{R_1} + E_{R_2} + E_{R_3}$$
$$= 6V + 12V + 6V$$
$$E_t = 24 \text{ volt}$$

De este modo, la suma de las caídas parciales de tensión en un circuito en serie, es igual a la tensión aplicada.

Leyes de los circuitos en serie

Los hechos destacados concernientes a los circuitos en serie pueden resumirse en forma de tres

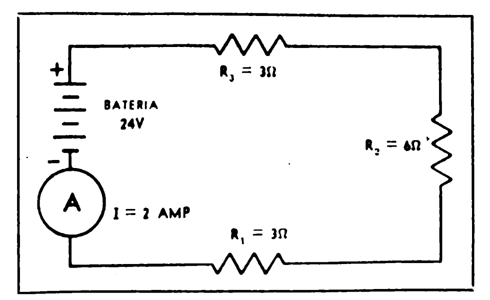


Figura 4-10. Circuito en serie con resistencias desiguales

leyes fundamentales que aplicaremos a cualquier circuito en serie. Estas leyes son:

1) En un circuito eléctrico en serie fluye la misma corriente a través de cada una de sus partes.

2) En un circuito en serie, la resistencia total es la suma de las resistencias parciales que componen el circuito.

3) En un circuito en serie, la tensión aplicada es igual a la suma de las caídas de tensión en cada una de sus partes.

Circuitos en paralelo

En el capítulo II se dijo que la conexión de elementos en paralelo provee dos o más pasos a la corriente del circuito. En la figura 4-11 se ve un ejemplo simple de circuito en paralelo, de dos ramas. Si se traza el camino de la corriente a través del circuito, se puede ver que sale del terminal negativo de la batería, pasa a través del amperímetro A_0 y llega al punto x. En este punto x hay dos caminos que la corriente puede seguir para llegar al terminal positivo de la batería. Uno es a través de A_1 y R_1 y el otro es por A_2 y R_2. En el diagrama la corriente indicada por A_1 ó A_2 no

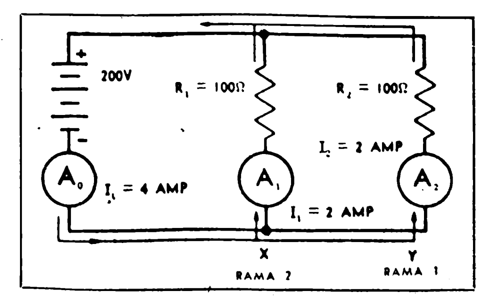


Figura 4-11. Circuito en paralelo, simple

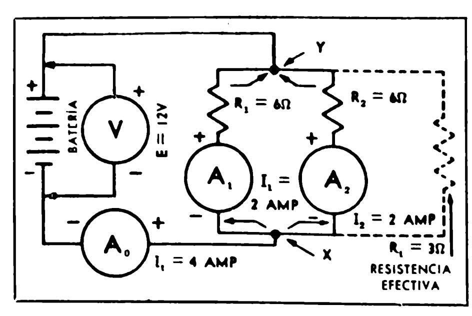


Figura 4-12. Circuito en paralelo, simple

es la misma que la indicada por A_o, puesto que la corriente indicada por A_o es la suma de las corrientes medidas por A_1 y A_2. Es evidente, por lo tanto, que R_1 y R_2 están en paralelo, y que este circuito en paralelo está en serie con la batería para completar el circuito eléctrico.

Un método sencillo que puede usarse para determinar cuándo un elemento está en serie o en paralelo con otro, es seguir el flujo de la corriente desde la fuente. Si la corriente se ramifica, las partes del circuito están asociadas en paralelo, si no es así, están en serie.

Esta afirmación se prueba mediante la medición de las corrientes de la figura 4-11, dado que la suma de las corrientes a través de R_1 y R_2 $(I_1 + I_2)$ representa la corriente total del circuito I_t, indicada por el amperímetro A_o.

$$\begin{aligned} It &= I_1 + I_2 \\ &= 2 \text{ amp} + 2 \text{ amp} \\ It &= 4 \text{ ampere} \end{aligned}$$

Tensión, corriente y resistencia efectiva en un circuito paralelo

El estudio anterior sobre circuitos en paralelo ha destacado la necesidad de trazar el flujo de corriente a través de un circuito, para determinar si el circuito es serie o paralelo. Mediante la aplicación de valores de tensión y corriente a un circuito simple en paralelo, se puede usar la ley de Ohm para obtener los valores de sus diversas partes. La figura 4-12 muestra un circuito en paralelo compuesto por una batería de 12 volt (según se indica en el voltímetro colocado a través de la batería) y dos resistores en paralelo (R_1 y R_2), cada uno con un valor de 6 ohm. Los amperímetros A_0, A_1 y A_2 están colocados en el camino de la corriente total I_t, y las corrientes de las ramas I_1 e I_2 respectivamente. El circuito de la figura 4-12 es similar al de la figura 4-11, excepto que ha sido agregado un voltímetro, y el circuito se diseñó de nuevo y se modificó ligeramente. En la figura 4-12, el terminal negativo de la batería está conectado al punto x a través del amperímetro A_0, y el terminal positivo, al punto y. El voltímetro colocado entre los puntos x e y indica 12 volt, dado que estos puntos representan los terminales negativo y positivo de la batería. Como los resistores en paralelo, R_1 y R_2, están conectados a los puntos x e y, la batería alimenta a cada uno de ellos con una tensión de 12 volt.

Si se sigue el camino de la corriente desde el terminal negativo de la batería, se puede ver que la corriente pasa a través del amperímetro A_0, el cual indicará el flujo total de la corriente a través del circuito hasta el punto x. En el punto x la corriente encontrará dos caminos mediante los cuales puede volver al terminal positivo de la batería. Un camino es a través del amperímetro A_1 y de la resistencia R_1 hasta el punto y; y el otro es a través del amperímetro A_2 y de la resistencia R_2 hasta el mismo punto y. En el punto y, las corrientes de ambas ramas, I_1 e I_2, se unen y vuelven al terminal positivo de la batería. Considerando el análisis realizado en la figura 4-12, se pueden establecer dos hechos fundamentales concernientes al uso de un circuito en paralelo.

1) En cada rama de un circuito en paralelo existe la misma tensión.

2) La intensidad total en un circuito en paralelo es igual a la suma de las intensidades de cada una de las ramas.

En la figura 4-12, la tensión total del circuito es de 12 volt, y la intensidad total indicada por el amperímetro A_0 es de 4 ampere. Con estos

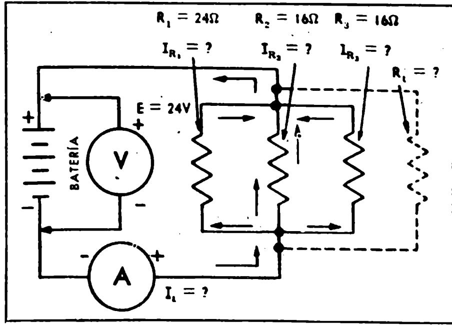


Figura 4-13. Circuito conteniendo tres resistores en paralelo

datos se puede calcular la resistencia efectiva del circuito (R_t) aplicando la ley de Ohm:

$$R = \frac{E_t}{I_t}$$
$$= \frac{12\ V}{4\ A}$$
$$R = 3\ ohm$$

En consecuencia, la resistencia efectiva del circuito es de 3 ohm. Nótese que este valor es menor que el de cada resistencia del circuito.

Para estudiar otro circuito en paralelo, puede utilizarse la figura 4-13. El diagrama del circuito presenta algunos de los valores del mismo: la tensión (E) y los resistores (R_1, R_2 y R_3). Las incógnitas son: la resistencia efectiva total del circuito (R_t), la corriente a través de R_1, R_2 y R_3, y la intensidad total del circuito (I_t). Para hallar estas incógnitas, es necesario aplicar los conocimientos sobre la acción de la tensión y de la corriente en un circuito en paralelo, y usar la ley de Ohm. Entonces se verá que los hechos salientes que conocemos son:

1) La tensión a través de cada una de los resistores R_1, R_2 y R_3 es de 24 volt.

2) La suma de las corrientes que fluyen a través de R_1, R_2 y R_3 es igual a la corriente total del circuito.

3) La corriente que circula en cada resistor puede calcularse mediante la ley de Ohm. La distribución de corriente en el circuito paralelo se calcula así:

$$I_{R_1} = \frac{E_{R_1}}{R_1}$$
$$= \frac{24\ V}{24\ \Omega}$$
$$I_{R_1} = 1\ ampere$$
$$I_{R_2} = \frac{E_{R_2}}{R_2}$$
$$= \frac{24\ V}{16\ \Omega}$$
$$I_{R_2} = 1.5\ ampere$$
$$I_{R_3} = \frac{E_{R_3}}{R_3}$$
$$= \frac{24\ V}{16\ \Omega}$$
$$I_{R_3} = 1.5\ ampere$$

La resistencia efectiva (R_t) del circuito completo puede calcularse mediante la ley de Ohm, puesto que se conoce la tensión total (E_t) de 24 volt, y la intensidad total (I_t), que es de 4 ampere ($I_{R_1} + I_{R_2} + I_{R_3}$)

$$R_t = \frac{E_t}{I_t}$$
$$= \frac{24\ V}{4\ amp}$$
$$R_t = 6\ ohm$$

Comparando el valor de R_t con R_1, R_2 y R_3, se nota nuevamente que la resistencia efectiva del circuito en paralelo es menor que la de cualquiera de las resistencias que lo componen.

Leyes para circuitos en paralelo

Los hechos indicados, concernientes a los circuitos en paralelo, pueden resumirse en tres leyes fundamentales aplicables a cualquier circuito en paralelo, y que son las siguientes:

1) En un circuito en paralelo cada rama está sometida a la misma tensión.

2) En un circuito en paralelo, la intensidad total es igual a la suma de las intensidades que circulan por cada rama.

3) En un circuito en paralelo, la resistencia efectiva es igual al cociente entre la tensión aplicada y la intensidad total, y este valor es siempre menor que la menor resistencia del circuito.

Combinaciones de resistencias en paralelo

En muchos casos es necesario conocer de antemano la resistencia efectiva de una combinación de resistores en paralelo. Según se explicó, en una combinación de resistores en paralelo, puede obtenerse la resistencia efectiva si se conoce la tensión aplicada y la intensidad circulante. Sin embargo, este proceso no resulta práctico a veces para la determinación de la resistencia efectiva, debido a que es engorroso e insume mucho tiempo.

En la práctica, el valor de la resistencia de un circuito siempre se considera *constante*. De los hechos presentados en el estudio de la ley de Ohm y de los circuitos en paralelo, se deduce que si la tensión se aumenta en una combinación de resistores en paralelo, el único efecto producido sería un incremento proporcional de las intensidades de las ramas. Por eso, no sería necesario conocer la tensión exacta para calcular la resistencia efectiva. De la ley de Ohm puede deducirse una fórmula para calcular la resistencia efectiva de dos o más resistores en paralelo. La deducción matemática de esta fórmula se expresa paso a paso a continuación. Obsérvese que se sustituyen las expresiones equivalentes de la ley de Ohm en el desarrollo de la fórmula con fines ilustrativos. Se han considerado tres resistencias.

$$R_t = \frac{E_t}{I_t}$$

$$= \frac{E_t}{I R_1 + I R_2 + I R_3}$$

$$= \frac{E_t}{\dfrac{E_{R_1}}{R_1} + \dfrac{E_{R_2}}{R_2} + \dfrac{E_{R_3}}{R_3}}$$

$$= \frac{E_t}{\dfrac{E_t}{R_1} + \dfrac{E_t}{R_2} + \dfrac{E_t}{R_3}}$$

$$= \frac{E_t}{E_t}\left[\frac{1}{\dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2} + \dfrac{1}{R_3}}\right]$$

$$R_t = \frac{1}{\dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2} + \dfrac{1}{R_3}} \qquad (4\text{-}6)$$

Este método de determinación de la resistencia efectiva de resistores en paralelo se llama *método recíproco* y puede aplicarse a cualquier número de resistencias en paralelo. Si se consideran las tres resistencias de la figura 4-13, y se usa el método recíproco, puede calcularse la resistencia efectiva (R_t), como se indica a continuación. (Obsérvese que para resolver la operación es necesario hallar el mínimo común denominador, y seguir las reglas para la resolución de operaciones con fracciones).

$$R_t = \frac{1}{\dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2} + \dfrac{1}{R_3}}$$

$$= \frac{1}{\dfrac{1}{24} + \dfrac{1}{16} + \dfrac{1}{16}}$$

$$= \frac{1}{\dfrac{2}{48} + \dfrac{3}{48} + \dfrac{3}{48}}$$

$$= \frac{1}{\dfrac{8}{48}}$$

$$= \frac{48}{8}$$

$$R_t = 60 \text{ ohm}$$

Para otro ejemplo del uso del método recíproco puede adoptarse el circuito de la figura 4-14 y calcular como sigue la resistencia efectiva del circuito:

$$R_t = \frac{1}{\dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2} + \dfrac{1}{R_3} + \dfrac{1}{R_4}}$$

$$R_t = \frac{1}{\dfrac{1}{10} + \dfrac{1}{10} + \dfrac{1}{20} + \dfrac{1}{30}}$$

$$= \frac{1}{\dfrac{6}{60} + \dfrac{6}{60} + \dfrac{3}{60} + \dfrac{2}{60}}$$

$$= \frac{1}{\dfrac{17}{60}}$$

$$= \frac{60}{17}$$

$$R_t = 3.53 \text{ ohm}$$

Estos dos ejemplos indican que el método recíproco puede usarse para determinar la resistencia efectiva de cualquier agrupación de resistores en paralelo, sin necesidad de realizar prácticamente el circuito y medir su tensión e intensidad.

Hay una cantidad de métodos distintos que pueden utilizarse para determinar la resistencia efectiva del tipo de circuito de que se habla. Sin embargo, cada uno de esos métodos requiere la existencia de ciertas relaciones entre los valores de las resistencias en el circuito. Uno de estos métodos es el *Método para resistencias iguales* que se usa cuando los resistores en paralelo son del mismo valor. Siempre que dos o más resistores de igual valor se conectan en paralelo, la resistencia efectiva será igual al valor de un resistor dividido por el número total de resistores. La figura 4-15 A muestra dos resistores de igual valor conectadas en paralelo. Al aplicar este método, el circuito ilustrado tendrá una resistencia efectiva de:

$$R_t = \frac{24}{2}$$

$$R_t = 12 \text{ ohm}$$

Cuando se conectan en un circuito eléctrico resistencias en paralelo del mismo valor, la corriente se dividirá igualmente entre todas las ramas del circuito. Por lo tanto, si tres resistencias equivalentes se conectan en paralelo, la corriente que

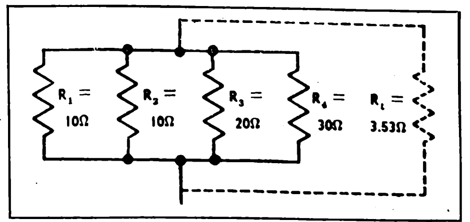


Figura 4-14. Resistencias en paralelo

fluye por cada rama será 1/3 de la total. Análogamente, si cuatro resistencias equivalentes se conectan en la forma indicada (fig. 4-15 B), la resistencia total será 1/4 de la resistencia de cualquiera de las cuatro.

La resistencia efectiva del circuito de la figura 4-15 B, es:

$$R_t = \frac{12}{4}$$

$$R_t = 3 \text{ ohm}$$

En resumen, el método para resistencias iguales se enuncia así:

Si varios resistores del mismo valor se conectan en paralelo, la resistencia efectiva se halla dividiendo el valor de una resistencia por el número total de resistencias. Los cálculos efectuados con este método pueden confirmarse reemplazando en la ecuación recíproca los valores dados.

Otro método para determinar la resistencia efectiva, es el *"método de producto sobre suma"*. Este método se aplica a las combinaciones en paralelo cuando tenemos dos resistencias de *distinto valor*. La fórmula que se utiliza en este método surge resolviendo la fórmula del método recíproco para R_t, en función de R_1 y R_2; y sin sustitución de valores equivalentes en la fórmula.

$$R_t = \frac{1}{\dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2}}$$

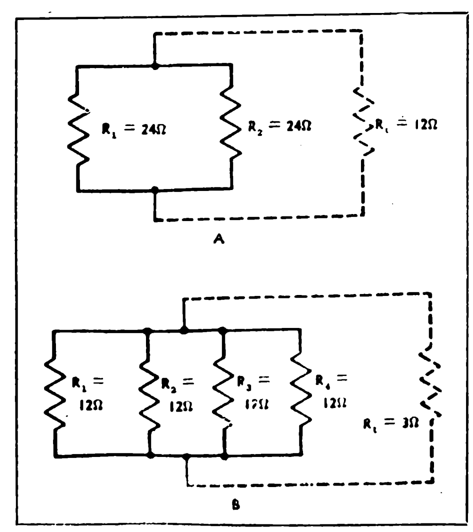


Figura 4-15. Resistencias de igual valor en paralelo

El mínimo común denominador es:

$$R_1 \times R_2 = R_1R_2$$

Introduciendo R_1R_2 en la ecuación y resolviendo

$$R_t = \frac{1}{\dfrac{R_2}{R_1R_2} + \dfrac{R_1}{R_1R_2}}$$

$$= \frac{1}{\dfrac{R_2 + R_1}{R_1R_2}} \qquad (4\text{-}7)$$

$$R_t = \frac{R_1R_2}{R_2 + R_1}$$

Esta es la fórmula usada en el método "producto sobre suma" para determinar el valor efectivo de dos resistores en paralelo. Puede verse la aplicación práctica de esta fórmula reemplazando los valores dados en la figura 4-16, y resolviendo por R_t, según se ve a continuación:

$$R_t = \frac{12 \times 4}{4 + 12}$$

$$= \frac{48}{16}$$

$$R_t = 3 \text{ ohm}$$

Para probar que el valor de la resistencia efectiva obtenida mediante el método "producto sobre suma" es correcto, se aplican los valores dados en la figura 4-16 a la fórmula de Ohm para resistencia:

$$R_t = \frac{E_t}{I_t}$$

$$= \frac{24V}{8A}$$

$$R_t = 3 \text{ ohm}$$

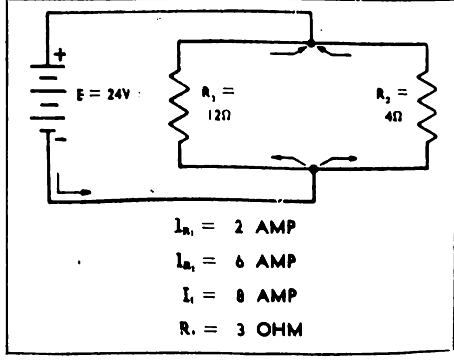


Figura 4-16. Dos resistores de distinto valor conectados en paralelo

En resumen, los distintos métodos de cálculo de la resistencia efectiva para resistencias en paralelo son:

1. Ley de Ohm para resistores intercalados en un circuito.
2. El método recíproco, para cualquier número de resistores en paralelo.
3. El método para resistores iguales.
4. El método "producto sobre suma", para dos valores distintos de resistores en paralelo.

Se puede elegir entre el uso del método recíproco y el método "producto sobre suma" para cálculo de resistencias equivalentes. Algunos prefieren usar el método recíproco para todos los casos, aun cuando puede ser difícil trabajar con las fracciones, mientras que otros prefieren usar el método "producto sobre suma". Con el tiempo y la experiencia, se hará evidente cuál es el método más apropiado en cada circunstancia.

Circuitos en serie-paralelo

El término "circuitos en serie-paralelo" indica que el circuito está compuesto por ambas clases de conexiones: en serie y en paralelo. La figura 4-17A muestra un ejemplo de circuito simple en serie-paralelo. Todos los hechos estudiados relacionados con circuitos en serie-paralelo son aplicables para la obtención de los valores desconocidos del circuito.

En la figura 4-17 A, se indican varios valores, y la incógnita es la intensidad total. El primer paso para resolver cualquier problema de un circuito en serie-paralelo, es trazar el camino que la corriente sigue a través del circuito, desde el polo negativo hasta el positivo de la fuente. Si se sigue el camino de la corriente trazando nuevamente el circuito, es más fácil comprender su funcionamiento. En 4-17 B se observa una nueva versión del dibujo 4-17 A. Resulta así plenamente evidente que R_2 y R_3 están en paralelo, porque la corriente se divide en el empalme de las resistencias R_1, R_2 y R_3, y se unifica nuevamente en la unión formada por R_2, R_3 y R_4. Los valores de R_2 y R_3 son de 10.000 ohm cada uno. Al usar el método de semejanza para resistencias en paralelo, se ve que el valor efectivo de ambas resistencias es de 5.000 ohm. Si se representa esta resistencia efectiva con el símbolo $R_{2\text{-}3}$, podemos diseñar nuevamente el circuito como se ve en 4-17 C, donde R_1, $R_{2\text{-}3}$ y R_4 están en serie con la batería. La resistencia efectiva total de todo el circuito es la suma de las resistencias en serie, la cual es 20.000 ohm, valor observado en 4-17 D. Mediante la aplicación de la ley de Ohm, es posible entonces calcular la corriente total del circuito, I_t, puesto que se conocen E_t y R_t.

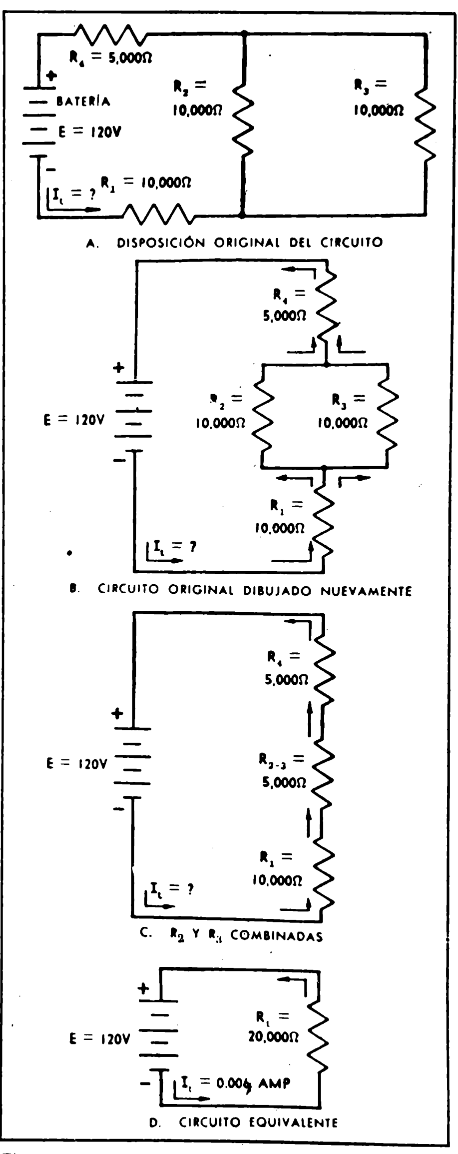


Figura 4-17. Simplificación del circuito serie-paralelo

$$I_t = \frac{E_t}{R_t}$$
$$= \frac{120\ V}{20.000\ \Omega}$$
$$I_t = 0{,}006\ amp$$

No siempre es necesario diseñar nuevamente un circuito cada vez que se completa un paso, como se hizo en la figura 4-17; en muchos casos el circuito resultante puede imaginarse sin necesidad de diseñarlo nuevamente.

Al tratar la ley de Ohm y las leyes vinculadas con los circuitos en serie y paralelo, ya se estudiaron los métodos que se emplean para determinar I_t.

Cálculos en circuitos en serie-paralelo

La resolución de circuitos resistivos aparentemente complejos, no es tan difícil como puede parecer si se utiliza un razonamiento lógico. Se debe examinar el circuito cuidadosamente, y luego se determina el camino que la corriente debe seguir a través del circuito para retornar a la fuente. Este primer paso convertirá un posible laberinto en un grupo de partes agrupadas ordenadamente en serie o paralelo. Después de este primer paso, puede determinarse la resistencia efectiva del circuito. Luego pueden hallarse los valores de tensión y corriente, para dar una visión completa del circuito. En muchos casos de análisis prácticos de un problema, sólo se da un número limitado de datos. A continuación pueden verse métodos de resolución paso a paso de algunos problemas. Las figuras adjuntas consignan los datos e incógnitas.

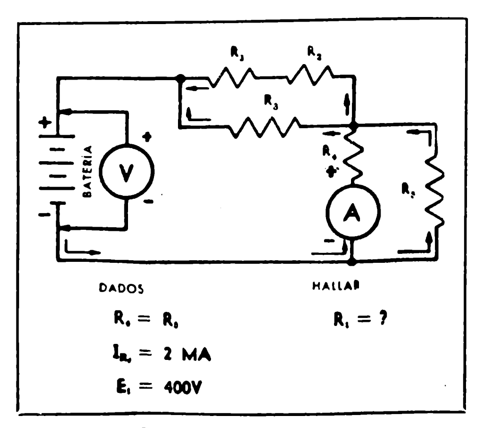


Figura 4-18. Problema 1º

Problema 1

En la figura 4-18 se observa un circuito en serie-paralelo. Mediante el uso de un voltímetro se comprueba que la tensión de la batería es de 400 V. Se mide la corriente de la rama R_4 y se observa que mide 2 miliampere. Los valores de R_1, R_2 y R_3 no pueden determinarse, pero se conoce que el valor de R_4 es el mismo que el de R_5. Hallar la resistencia efectiva del circuito.

1º Paso: El trazado del flujo de corriente a través del circuito (empezando por el terminal negativo de la batería), y se ve que la corriente total del circuito fluye a través del acoplamiento en paralelo de R_4 y R_5.

2º Paso: Como la corriente medida en la rama R_4 es de 2 miliampere, y el valor de la R_4 es el mismo que el de la R_5, la corriente circulante a través de esta última será tambin de 2 miliampere.

3º Paso: Según lo dicho en el paso 1, la corriente total del circuito pasa a través de la combinación en paralelo de R_4 y R_5; por lo tanto, la corriente total del circuito es:

$$I_t = I_{R_4} + I_{R_5}$$
$$= 2ma + 2ma$$
$$I_t = 4ma$$

4º Paso: Se conoce la tensión total del circuito ($E_t = 400$ V) y se halló que la intensidad total valía 4ma.

Mediante el uso de la fórmula de Ohm, puede hallarse la resistencia efectiva (R_t) como sigue:

$$R_t = \frac{E_t}{I_t}$$
$$= \frac{400}{4 \times 10^{-3}}$$
$$R_t = 100 \times 10^{-3}$$
$$R_t = 100\ K\Omega$$

Problema 2

En la figura 4-19 todos los valores dados se colocaron cerca de las partes del circuito que les corresponden. Los valores a obtener están colocados bajo la palabra "incógnita".

1º Paso: El trazado del flujo de corriente a través del circuito revela que R_3 está en paralelo con la combinación de R_4 y R_5 en serie. La combinación resultante (1) está en serie con R_1 y R_2 (2).

2º Paso: Al observar las incógnitas, se notará que se desea obtener el valor de R_5, y mirando la figura se determinará si se dispone de datos suficientes. Se verá que se tiene la intensidad

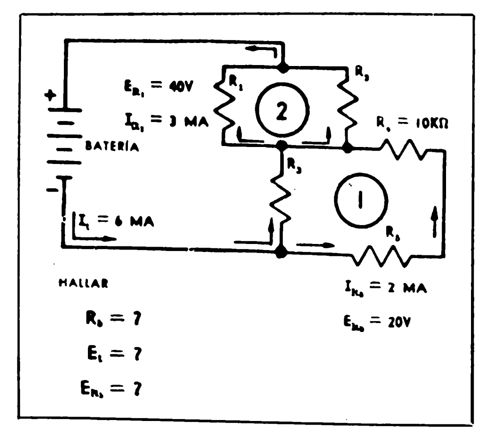


Figura 4-19. Problema 2º

a través de R_5: ($I_{R_5} = 2ma$), y la caída de tensión en R_3: ($E_{R_5} = 20V$). Por lo tanto:

$$R_5 = \frac{E_{R_5}}{I_{R_5}}$$
$$= \frac{20}{2 \times 10^{-3}}$$
$$R_5 = 10 \times 10^3, \text{ ó } 10K$$
$$R_5 = 10\ K\Omega$$

3º Paso: La siguiente incógnita es la tensión de la batería, E_t. Se vuelve a mirar el diagrama, y se observa si se cuenta con datos suficientes para hallar E_t. Se comprueba que se conocen las caídas de tensión en R_1 y R_5. Sin embargo, para determinar la caída de tensión en el circuito en paralelo (1), debe hallarse la caída de tensión a través de R_4.

4º Paso: La resistencia de R_4 es de 10 K ohm, y la corriente a través de R_4 es la misma que fluye a través de R_5 (puesto que están en serie); por lo tanto E_{R_4} será:

$$E_{R_4} = I_{R_4} \times R_4$$
$$= 2 \times 10^{-3} \times 10 \times 10^3$$
$$E_{R_4} = 20 \text{ volt}$$

5º Paso: Según se dijo en el 3º paso, la tensión total del circuito es la caída a través del circuito (1) más la caída de tensión a través del circuito (2). Se utiliza la regla que dice que la caída de tensión en cada rama de una conexión en paralelo es la misma; la tensión a través de (1) es la suma de las caídas de tensión en R_4 y R_5; y la tensión a través del circuito (2) es la caída de tensión a través de R_1, de donde tendremos que la tensión total E_t será:

$$E_t = E_{R_1} + E_{R_4} + E_{R_5}$$
$$= 40V + 20V + 20V$$
$$E_t = 80 \text{ volt}$$

6º Paso: La incógnita restante, E_{R_2}, puede determinarse mirando sencillamente, el diagrama del circuito. Como R_1 y R_2 están en paralelo, la tensión E_L será la misma que E_R, o sea 40 volt.

En el análisis del problema anterior, la mayoría de las leyes desarrolladas para circuitos simples en serie y en paralelo y la ley de Ohm, se utilizaron de una manera lógica para dar soluciones a las combinaciones de circuitos en serie y en paralelo. En otros tipos de equipos eléctricos y electrónicos existen circuitos mucho más complejos; sin embargo, todos ellos pueden ser reducidos a otros más sencillos, resolubles mediante la ley de Ohm.

Algunos circuitos muy complejos, son a menudo más fáciles si se resuelven las corrientes y tensiones directamente, en lugar de reducir el circuito a un simple esquema. El medio por el cual puede obtenerse la solución de tales circuitos es la aplicación de la ley de Kirchoff, que se presenta detalladamente en el próximo capítulo.

4-6 RESUMEN

La resistencia eléctrica puede aparecer tanto en alambres de conexión como en partes resistivas diseñadas especialmente. La resistividad específica de un material es la medida de la resistencia ofrecida al pasaje de una corriente por un centímetro cúbico de ese material. Comúnmente, se toma la resistencia relativa de los materiales con respecto al cobre. El cobre es el primer material conductor, puesto que se puede producir económicamente y tiene la propiedad de conducir muy bien la corriente. La conductividad o conductancia es el término usado para indicar la capacidad de conducción de un material; es también la recíproca de la resistencia, y se expresa en mho (ohm deletreado al revés).

Se han establecido patrones para determinar las dimensiones normales que permitan un medio de identificación de los alambres que se usan para conexiones en los equipos eléctricos. El patrón para conductores de cobre es la Norma Americana de normalización de alambres, la cual especifica también la resistencia y capacidad de conducción de sus distintos tamaños. La resistencia total de cualquier material conductor depende de su longitud, sección transversal y temperatura. Los elementos electrónicos llamados resistores se fabrican con diversos valores óhmicos. Estos elementos resistivos están divididos en dos tipos generales:

fijos y variables. Como el flujo de una corriente a través de una resistencia produce calor, debido a la transformación de energía, los resistores se diseñan y fabrican con distintas capacidades de disipación de energía.

El primer principio fundamental que se estudió se relacionaba con la naturaleza del flujo de una corriente eléctrica. El segundo, que vemos en este capítulo, es la relación existente entre tensión, corriente y resistencia en un circuito eléctrico. Esta relación se denomina "Ley de Ohm" y establece que la corriente en un circuito eléctrico es directamente proporcional a la resistencia. En los circuitos resistivos que se presentan en este capítulo, la ley de Ohm se utiliza para calcular distintas magnitudes, y también para reducir los circuitos a otros equivalentes, más sencillos.

Una vez reducidos a su más simple expresión, los circuitos entran en una de las tres categorías: en serie, en paralelo o la combinación de ambos. La distribución de tensión, corriente y resistencia en los circuitos en serie y paralelo, siguen normas definidas, que se han registrado en forma de leyes.

Las leyes de los circuitos en serie son:

1. La resistencia total es igual a la suma de las resistencias individuales.
2. La misma corriente fluye en todas las partes del circuito.
3. La suma de las caídas de tensión a través de las resistencias individuales, es igual a la tensión aplicada.

La leyes de los circuitos en paralelo son:

1. La tensión aplicada en cada rama es la misma.
2. La corriente total es igual a la suma de las corrientes individuales de cada rama.
3. La resistencia efectiva es igual a la tensión aplicada dividida por la corriente total, y es siempre menor que la más baja resistencia individual del circuito.

Cuando estas leyes se aplican en un circuito resistivo relativamente complejo, los valores del circuito se pueden calcular por medio del uso de la ley de Ohm.

Los circuitos de un equipo eléctrico no pueden ser identificados con un examen descuidado. En efecto: la mayoría de las partes no se parecen a los símbolos esquemáticos que las representan. Los alambres de interconexión pueden aparecer en recorridos de trazado complicado. Cuando se posee un diagrama, el circuito puede analizarse en cuanto se refieren a su funcionamiento o a su construcción. La posibilidad de analizar circuitos fácilmente y con exactitud, requiere experiencia y uso constante de las leyes fundamentales de los circuitos.

CUESTIONARIO

1. Defina el término *resistencia eléctrica*.
2. Defina el término *resistividad*.
3. Nombre los tres factores que determinan la resistencia total de un material conductor.
4. ¿Cuáles son los dos materiales más prácticos para utilizar como conductores en la transmisión de energía eléctrica?
5. ¿Qué se entiende por coeficiente de temperatura positivo, y qué, por coeficiente de temperatura negativo?
6. ¿Cuáles son las dos clasificaciones de los resistores?
7. Indique el orden y los colores de las franjas en un resistor cuyas características son: 15.000Ω; 5 % de tolerancia.
8. Enuncie las siguientes leyes: 1) Ley de Ohm para corriente; 2) Ley de Ohm para tensión; 3) Ley de Ohm para resistencia.
9. Si se duplica la tensión aplicada a un circuito eléctrico y se mantiene constante la resistencia, ¿qué pasa con la corriente?
10. ¿Qué tensión es necesaria para producir una corriente de 2 ampere en un resistor de 12 ohm?
11. ¿Cuál es la corriente circulante a través de un soldador eléctrico cuya resistencia es de 200 ohm, cuando se enchufa en la red de 120 volt?
12. ¿Qué es un circuito en serie?
13. Defina el término *caída de tensión*.
14. Si tres resistores de 150, 100 y 75 ohm están conectados en serie, ¿cuál es la resistencia efectiva de todo el circuito?
15. Indique las leyes de los circuitos en serie.
16. ¿Qué es un circuito en paralelo?
17. ¿Cuál es el método más sencillo para determinar si un circuito está conectado en serie o en paralelo?
18. Indique las leyes para los circuitos en paralelo.
19. ¿Qué es un circuito en serie-paralelo?
20. Resuelva todas las incógnitas, en el orden establecido en las figuras 4-20 hasta 4-30.

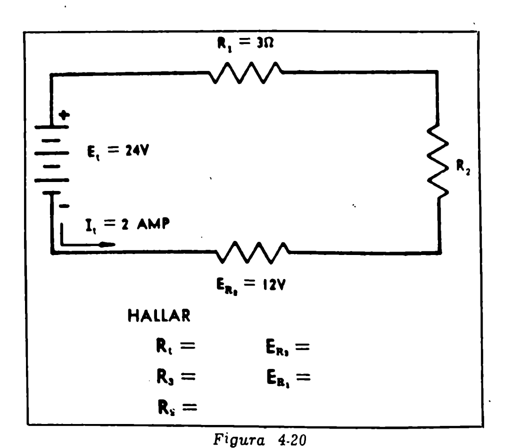


Figura 4-20

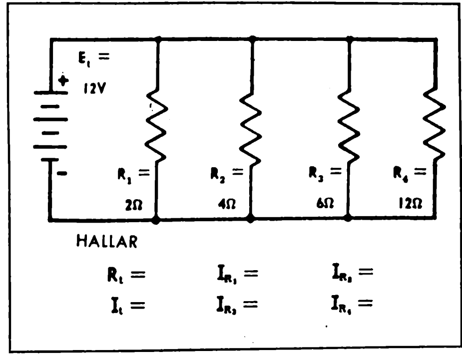


Figura 4-23

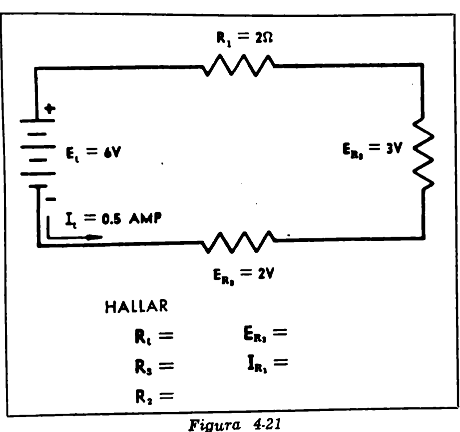


Figura 4-21

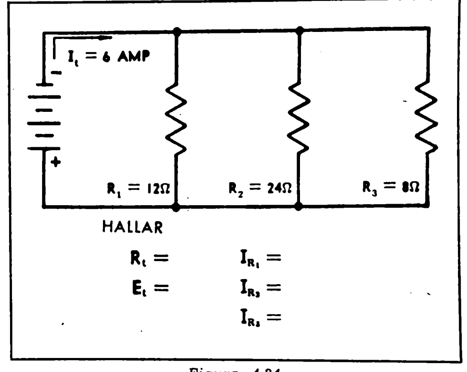


Figura 4-24

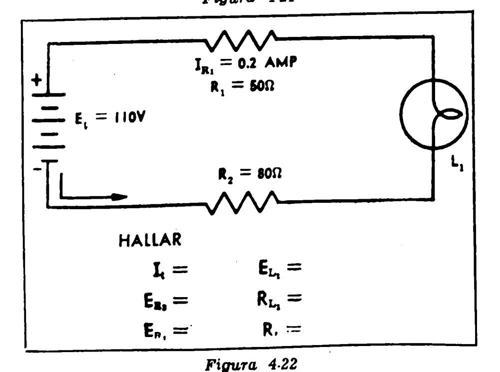


Figura 4-22

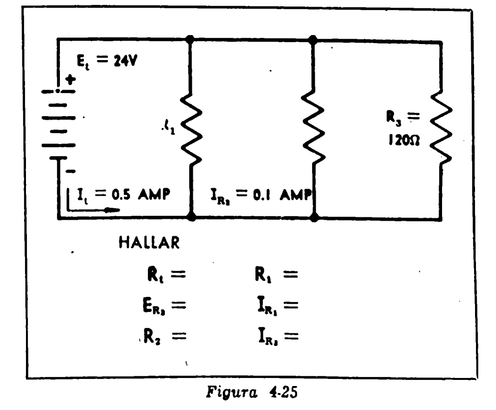


Figura 4-25

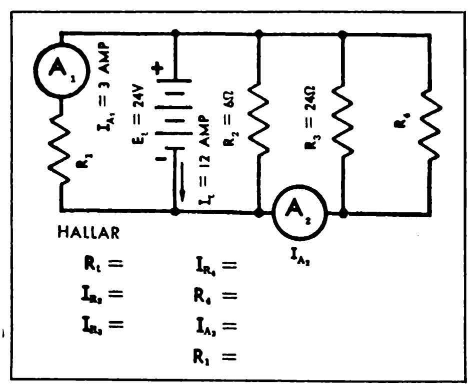


Figura 4-26

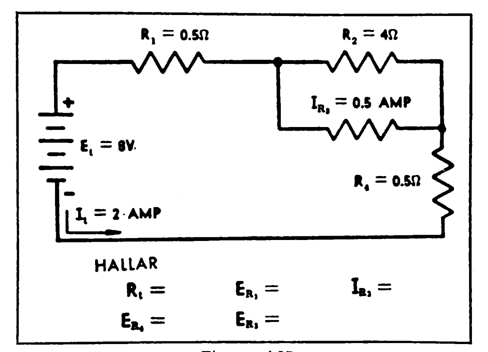


Figura 4-27

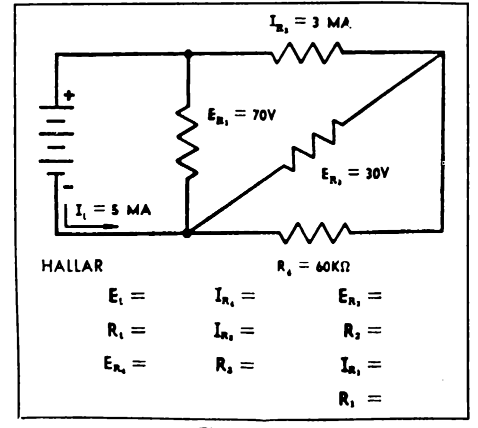


Figura 4-28

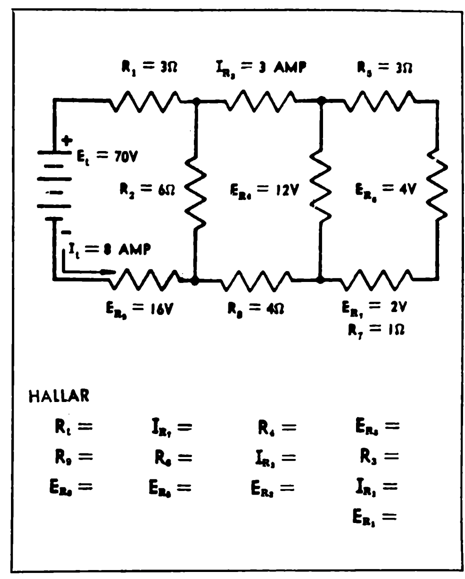


Figura 4-29

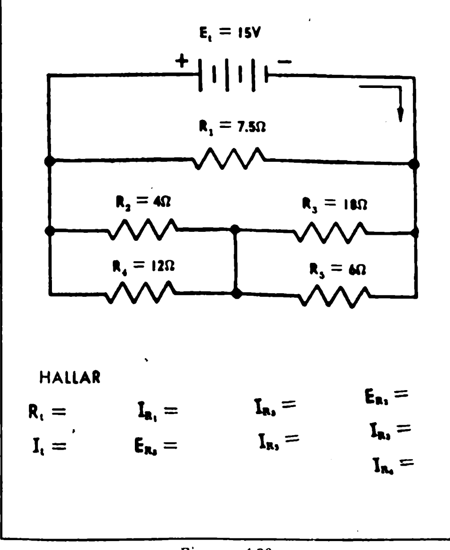


Figura 4-30

CAPITULO V

Fundamentos del Magnetismo

5-1 Introducción

La fuerza eléctrica y la fuerza magnética son las dos fuerzas invisibles, fundamentales para el funcionamiento del equipo electrónico y de otros muchos sistemas electrónicos modernos. Sus aplicaciones se extienden desde un simple timbre hasta las más complicadas memorias magnéticas de los computadores gigantes.

En la actualidad, la mayoría de los equipos electrónicos cuenta con imanes o efectos magnéticos; y aunque a estos equipos pueda considerárselos modernos, los aspectos fundamentales de la fuerza magnética se conocen de tan antiguo como la historia misma.

La propiedad más conocida de todos los efectos magnéticos es la atracción del hierro o de sus aleaciones. A esta propiedad se la denomina magnetismo. Se podrá apreciar que las leyes del magnetismo son muy parecidas a las de las cargas eléctricas.

5-2 TIPOS DE IMANES

El material que tiene la propiedad de atraer el hierro o las aleaciones de hierro se denomina *imán*. Los materiales atraídos por el imán se llaman *materiales magnéticos*. Algunos de estos materiales son: el hierro, acero, níquel, cobalto o sus aleaciones. Los materiales que no sufren la atracción del imán, como la madera, el papel, vidrio, cobre o estaño, se denominan *no-magnéticos*. El imán puede atraer al material magnético por contacto directo, a cierta distancia, o a través de un material no-magnético. La figura 5-1 muestra la atracción magnética por contacto, y la figura 5-2, la atracción magnética a cierta distancia y a través de un material no magnético.

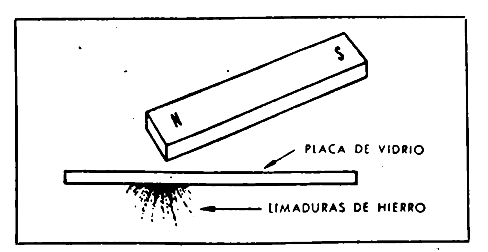


Figura 5-2. Atracción magnética a distancia, a través de material no magnético

Imanes naturales

El fenómeno del magnetismo se observa primeramente en la naturaleza al descubrirse un tipo de piedra —en realidad un trozo de mineral de hierro— cerca de la ciudad de Magnesia, en Asia Menor. Se denominó *magnetita* a la piedra, nombre derivado de la localidad en que fue descubierta por primera vez. El nombre de *imán* deriva de diamante, en latín.

Hoy se sabe que la magnetita es un mineral de hierro, que tiene propiedades magnéticas cuando se halla en estado natural, sin elaborar. Por esa razón se llama *imán natural*. Los imanes naturales sólo tienen ahora un valor histórico, pues la industria fabrica mucho mejores artificialmente.

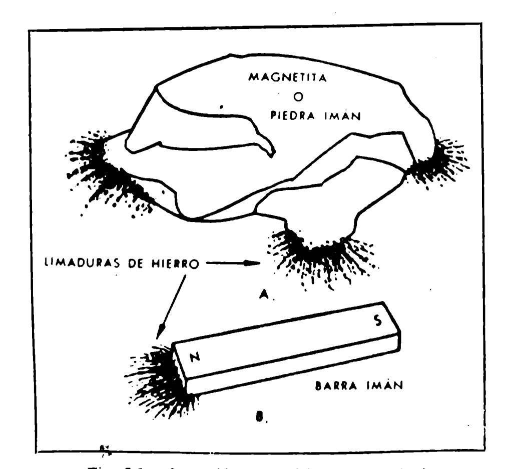


Fig. 5-1. Atracción magnética por contacto

Imanes artificiales

Los imanes que se fabrican a partir de materiales magnéticos, normalmente no magnetizados, se denominan *imanes artificiales*. En la figura 5-3 pueden verse algunos tipos comunes de estos últimos. Tales imanes pueden producirse ya sea poniendo en contacto un imán natural con un material magnético, ya sea frotando un material magnético con un imán natural, o por medios eléctricos. Los imanes artificiales que se producen por contacto o frotamiento con un imán natural son relativamente débiles, en relación a las potencias logradas actualmente. Los imanes más potentes se obtienen por métodos eléctricos, procedimientos que son a su vez los que más se utilizan y que explicaremos más adelante.

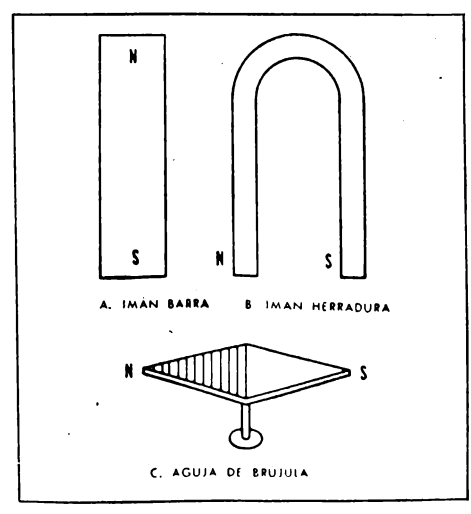


Figura 5-3. Ejemplos de imanes artificiales

El procedimiento de producción de imanes artificiales frotando el material magnético o poniendo el material en contacto con un imán natural, se llama *magnetismo inducido*. En la figura 5-1 puede observarse el magnetismo inducido por contacto. Las limaduras de hierro que se muestran arracimadas alrededor del extremo de la barra magnética, están magnetizadas por la imantación que les produce el contacto con el imán. Cada limadura se transforma en un diminuto imán, debido a este proceso de inducción. La figura 5-4 muestra el magnetismo inducido por frotamiento de una barra magnética (de hierro o acero). Cuando se usa este método, es importante que todas las pasadas sean hechas en la misma dirección, pues de no tenerse esta precaución la barra no se magnetizará.

Los distintos materiales magnéticos tienen diversos grados de susceptibilidad magnética (capacidad de magnetizarse rápidamente y conservar la imantación adquirida). Esta última capacidad del material de retener su magnetismo se llama *retentividad* del material. Las aleaciones de hierro y acero tienen una retentividad relativamente alta, mientras que otras, tales como el hierro dulce o el níquel, carecen casi de ella. El magnetismo que permanece en el material una vez que éste ha sido magnetizado se llama *magnetismo remanente*. La cantidad de magnetismo remanente que permanece en una muestra depende fundamentalmente de tres cosas: la retentividad del material, la fuerza del imán inductor y el tiempo durante el cual el material está en contacto con su inductor. Un tipo de imán artificial es el *imán temporario*. Por definición, es un imán que pierde su magnetismo rápidamente, a partir de su apartamiento de la fuerza magnetizante. Cuando las limaduras de hierro dulce y la barra imantada están separadas (fig. 5-1), las limaduras pierden su magnetismo muy rápidamente. Los imanes temporarios (ya sean pequeños o grandes) están hechos con un material magnético de baja retentividad y pequeño magnetismo remanente. Otro tipo de imán artificial, el *imán permanente*, es aquél que retiene su magnetismo durante un lapso considerable, a partir de su separación de la fuerza magnetizante. Si se usan limaduras de acero en vez de las de hierro dulce (en la fig. 5-1) se obtendrán los mismos resultados, excepto que las de acero retendrán su magnetismo durante un período mayor de tiempo, después de ser separadas de la barra imantada. Los imanes permanentes se hacen de material magnético de gran retentividad, y de una gran cantidad de magnetismo remanente.

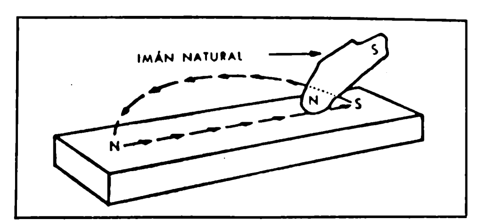


Figura 5-4. Frotamiento para producir un imán artificial

5-3 POLOS MAGNETICOS

Los efectos del magnetismo no están distribuidos uniformemente sobre la superficie del imán, pues son fuertes en los extremos y débiles en el centro del imán. Las regiones donde los efectos magnéticos son mayores, se llaman *polos* del imán. Estos polos se ilustran en la figura 5-5.

Cuando se esparcen limaduras sobre toda el área de una barra imantada (5-5 A), las que caen cerca de los extremos son atraídos y forman racimos o penachos en esos extremos. Rara vez será atraída una limadura que caiga cerca del centro. De esta manera se puede ver que la barra imantada presenta regiones distintas o polos; cada uno indica la

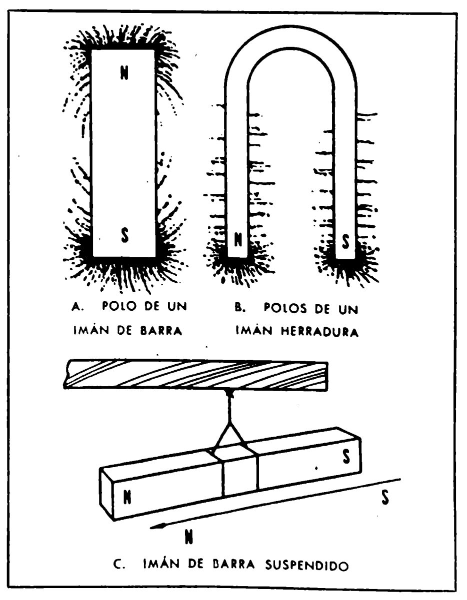


Figura 5-5. Polos de imanes

región donde la fuerza magnética es mayor. Los mismos efectos se pueden encontrar en un imán en herradura (5-5 B), el cual es, en suma, una barra imantada curvada de manera tal que los polos se encuentren cerca uno del otro.

Cuando se suspende una barra de manera que pueda oscilar libremente en un plano horizontal (fig. 5-5 C) la misma oscilará hasta detenerse, con uno de sus extremos señalando hacia el norte. Cuantas veces se repita este experimento se producirá el mismo resultado. Siempre será el mismo extremo el que señale el norte. Cuando se estableció este hecho por primera vez, se decidió arbitrariamente llamar *polo norte* del imán al extremo del mismo que señalaba el norte terrestre. De manera similar, el extremo que señalaba el sur geográfico fue denominado *polo sur* del imán. Esta denominación se usa todavía. En efecto, los imanes permanentes están marcados "N" o "+" en su polo norte y "S" o "—" en su polo sur.

La Tierra como imán

El hecho de que la aguja de una brújula se alinee en una dirección particular en cada punto de la tierra, indica que ésta está rodeada por un campo magnético. La distribución de este campo es la misma que podría ser producida por una inmensa barra magnética ubicada en el centro de la tierra (fig. 5-6).

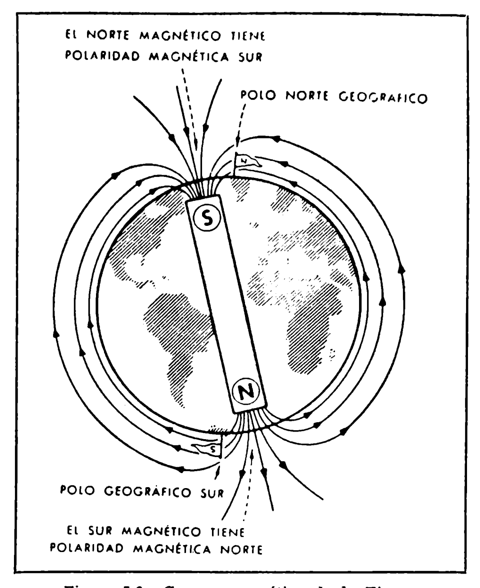


Figura 5-6. Campo magnético de la Tierra

El eje magnético de la Tierra forma un ángulo de casi 15° con su eje geográfico. Las líneas de fuerza del campo magnético de la tierra salen del hemisferio Sur geográfico y entran por la superficie de la misma en el hemisferio Norte geográfico. De la definición según la cual el Polo Norte de una brújula es su extremo que señala el Norte, resulta evidente que el "Polo Norte Geográfico" es un "Polo Sur magnético", puesto que atrae el polo norte de la brújula. Para evitar confusión, debe recordarse que el "Polo Norte" de una brújula es el extremo que señala el norte geográfico.

Teoría molecular del magnetismo

En el transcurso de los años, la investigación científica ha elaborado diversas teorías para explicar el magnetismo. La más popular es la teoría de Weber, más comúnmente conocida como "Teoría molecular del magnetismo", que se basa en la suposición de que todas las moléculas de un material magnético son pequeños imanes individuales.

Cuando se parte en dos un imán permanente, cada una de las partes se transforma en un nuevo imán con sus polos N y S. Si estos dos pedazos se parten nuevamente, se obtienen cuatro imanes. Cualquiera sea el número de veces que se efectúe esta división, los trozos del imán original se transforman siempre en imanes completos.

Si el proceso de división en mitades se continúa hasta que una última ruptura nos permita obtener una sola molécula, ésta es también un imán.

De acuerdo con esta teoría, cuando un material está desmagnetizado, sus imanes moleculares están orientados en una forma casual, como se ilustra en la figura 5-7 A. El resultado de esta disposición casual es la anulación de los efectos magnéticos de los imanes moleculares que forman el material magnético. Cuando éste es puesto en contacto con un imán poderoso, los imanes moleculares se alinean en una dirección definida. A medida que se aumente la fuerza del imán, muchos imanes moleculares se alinearán en la misma dirección cada vez más intensamente. La figura 5-7 B muestra cómo se alinean los imanes moleculares al estar próximos o en contacto con un imán potente. Nótese que en un extremo de la barra de hierro hay muchos diminutos polos norte, y en el otro extremo hay muchos pequeños polos sur. Estos pequeños polos, actuando en conjunto, producen fuertes efectos magnéticos externos en los extremos de la barra de hierro. A los costados de la barra, los efectos magnéticos ejercidos sobre materiales externos son reducidos debido a la interacción de los polos

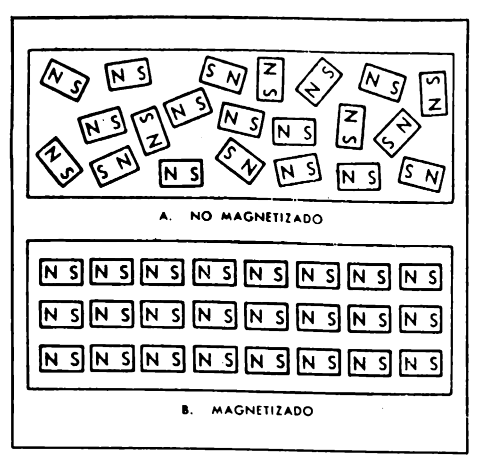


Figura 5-7. Las moléculas en imanes de barra, imantados y no imantados

norte y sur de los imanes elementales. La razón por la cual cada trozo de imán tiene siempre dos polos al ser partido en dos, se deduce fácilmente observando la figura 5-7 B. Cualquiera sea el lugar donde se ha roto el imán quedarán siempre en los extremos de cada trozo muchos diminutos polos norte y polos sur.

Cuando todos los imanes moleculares están alineados en la misma dirección, se dice que el material está saturado. Es evidente, entonces, que hay un límite definido para la cantidad de carga magnética que puede tener un material. Cuando todos los imanes moleculares se han alineado en perfecto orden, nada se puede hacer para aumentar la fuerza del imán, por grande que sea el campo magnético en que se lo coloque.

Atracción y repulsión de los polos magnéticos

Cuando una barra imantada se suspende de modo que pueda oscilar libremente en un plano horizontal, y el polo norte de un segundo imán se coloca cerca del polo del mismo nombre del imán suspendido (fig. 5-8 A), este último será repelido. Obtendremos el mismo resultado si se enfrentan los polos sur de ambos imanes. Cuando el polo sur del segundo imán se acerca al polo norte del imán suspendido (fig. 5-8 B) ambos polos se atraen mutuamente.

Los hechos enunciados se usan como base para enunciar la ley fundamental del magnetismo, que dice: *Los polos de igual nombre se repelen, los de distinto nombre se atraen.*

También puede enunciarse de una forma ligeramente distinta: la fuerza que se ejerce entre dos polos iguales es de mutua repulsión; y la fuerza que se ejerce entre dos polos desiguales es de mutua atracción. Es de notar la similitud existente entre la atracción y repulsión magnética, y la atracción y repulsión electrostática.

5-4 FUERZA MAGNÉTICA

Dado que el imán atrae trozos de hierro, debe ejercer una fuerza sobre los mismos. La comprobación de que esta fuerza actúa a distancia, puede observarse en la acción ejercida por un imán sobre las limaduras de hierro, aunque no estén en contacto. La fuerza magnética actúa a través de los materiales no magnéticos, como en la figura 5-2, donde las limaduras son atraídas por el imán no obstante estar colocadas entre ambos una lámina de vidrio. Además, la fuerza ejercida entre el imán y las limaduras de hierro es mutua, es decir que un trozo de hierro sujeto firmemente atraerá al imán con la misma fuerza que el imán atraería al trozo de hierro.

Factores que afectan la fuerza magnética

La fuerza de atracción y repulsión entre dos polos magnéticos varía con la distancia que hay entre ellos. Cuando los polos están separados por una distancia considerable, no hay efectos visibles. Sólo después que se acercan los polos semejantes (parte A de la figura 5-8), es repelido el polo suspendido. Asimismo, sólo después de que los dos po-

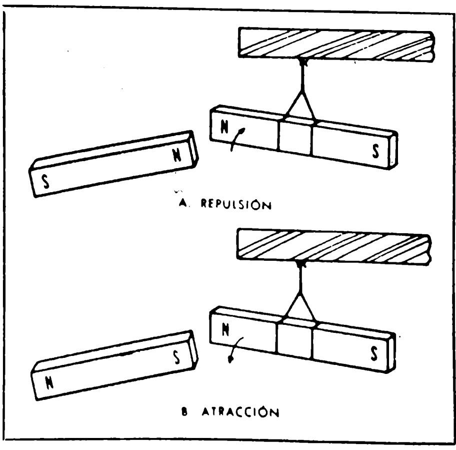


Figura 5-8. Atracción y repulsión de polos iguales y opuestos

los distintos se aproximan, el polo suspendido es atraído (parte B de la figura 5-8). Esta fuerza de atracción o repulsión entre polos magnéticos varía inversamente con el cuadrado de la distancia. Esto significa que cuando la distancia entre dos polos se reduce a la mitad, la fuerza se hace cuatro veces más grande; inversamente, si la distancia entre los polos se duplica, la fuerza se convierte en un cuarto de la cantidad original.

Además de variar con la distancia entre los polos, la fuerza de atracción y repulsión entre dos polos magnéticos también varía con la cantidad de fuerza que los polos individuales son capaces de ejercer. La fuerza de un polo, a su vez, varía con su tamaño, el material con el cual está fabricado y su grado de magnetización.

Medida de la fuerza magnética

La fuerza magnética de atracción o repulsión entre dos polos magnéticos es similar a la fuerza de atracción o repulsión entre dos cargas eléctricas. La magnitud de estas cargas fue medida por primera vez por Coulomb.

Coulomb dedujo una ley, similar a la de las cargas eléctricas, para la fuerza magnética de atracción o repulsión entre dos polos magnéticos; esta ley establece:

"La fuerza ejercida mutuamente entre dos polos magnéticos es directamente proporcional al producto de las masas magnéticas de cada polo e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separan."

Esta ley se expresa matemáticamente por la ecuación:

$$F = \frac{m_1 m_2}{d^2} \qquad (5\text{-}1)$$

donde:

F = fuerza de atracción o repulsión entre dos polos magnéticos en dina.

$m_1 m_2$ = masa magnética de los dos polos en unidades magnéticas.

d = distancia entre los dos polos magnéticos en centímetros.

Como nueva forma de similitud con la ley de cargas eléctricas, resulta también que la fuerza magnética de atracción o repulsión depende del medio en el cual se ejerce. Este hecho se tiene en cuenta para modificar la fórmula anterior como sigue:

$$F = \frac{m_1 m_2}{\mu d^2} \qquad (5\text{-}2)$$

donde:

F, m_1, m_2 y d tienen el mismo significado que en 5-1, μ = permeabilidad del medio.

La *permeabilidad* es un factor que indica la facilidad con que las líneas de fuerza pueden atravesar un medio. El término permeabilidad como el término constante dieléctrica, es la relación del pasaje de líneas magnéticas de fuerza en el medio dado con respecto al mismo pasaje en el aire o en el vacío. Este término será usado nuevamente al tratar los principios magnéticos.

Aunque la ley de Coulomb establece un principio magnético básico, no se utiliza comúnmente para determinar la fuerza efectiva de las líneas magnéticas de fuerza. Para ello se emplean métodos más comunes y términos relacionados que se explican en el estudio de los circuitos magnéticos.

5-5 CAMPOS MAGNÉTICOS

Como un polo magnético actúa a distancia sobre otros polos y sobre materiales magnéticos, debe existir una fuerza invisible en el espacio alrededor del polo. El espacio alrededor de un imán donde la invisible fuerza magnética es evidente, se llama *campo magnético* externo del imán. El campo magnético total consiste en el campo externo más el campo que atraviesa el material del imán.

Un campo magnético puede considerarse como una fuerza, pues, al igual que una fuerza, un campo magnético también tiene dirección. Un polo magnético colocado en el campo se moverá en la dirección de la fuerza. Si fuera un polo norte se movería en una dirección, si fuera un polo sur se movería en la dirección opuesta. Para encontrar la dirección del campo magnético debe conocerse la polaridad del polo de prueba del campo. La *dirección positiva* de un campo magnético en cualquier punto, se define como la dirección en que tendería a moverse un polo norte libre, colocado en dicho punto.

Ciertos hechos concernientes a la naturaleza del campo magnético creado por un imán, pueden reproducirse usando una brújula para investigarlo. Cuando dicha brújula está colocada cerca del polo sur de una barra imantada, oscila y coloca su polo norte (el que señala el polo norte geográfico) tan cerca como le resulta posible, del polo sur de la barra (fig. 5-9 A). Si se coloca cerca del polo norte del imán, la aguja oscila y apunta finalmente con su extremo sur hacia el polo norte de la barra (fig. 5-9 B). La ley de atracción y repulsión entre polos de distinto e igual nombre explica la acción de la aguja de la brújula.

Cuando la brújula se coloca cerca del centro de la barra, la fuerza existente en el campo magnético hace tomar a la aguja la posición de la figura 5-9 C. En la parte D de la misma figura se ha colocado una cantidad de agujas en varios puntos del campo mag-

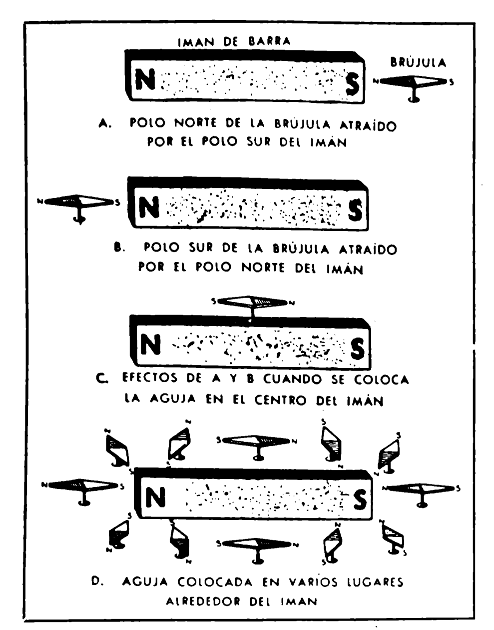


Figura 5-9. Efectos de los campos magnéticos sobre las brújulas

nético. Nótese que las agujas apuntan en direcciones distintas cuando se coloca en puntos distintos del campo. Se ve entonces, que un campo magnético tiene una dirección que varía de un punto a otro.

Puede obtenerse una representación de la intensidad del campo magnético que rodea una barra imantada, mediante el uso de limaduras de hierro esparcidas en el espacio que rodea la barra. Muchas limaduras cercanas a los polos del imán son atraídas por éstos, mientras que las demás se disponen según se puede observar en la figura 5-10 A. Nótese que la fuerza del campo es mayor cerca de los polos, y muchas limaduras son atraídas y se adhieren, observando distintas alineaciones. Según aumenta la distancia a que se encuentran del polo dado, el campo se hace menos intenso y, por lo tanto, la acción del mismo sobre las limaduras es también menor. En los límites del campo, el efecto ejercido por éste sobre las limaduras es poco apreciable. Este modelo es una representación de la manera en que las fuerzas magnéticas del campo actúan sobre los materiales magnéticos colocados dentro del mismo. De allí, a través de la investigación del campo magnético de un imán, se observa que cada campo se caracteriza por una fuerza que varía en *dirección* e *intensidad,* de un punto a otro del campo.

Líneas de fuerza magnética

Con frecuencia se desea representar en un dibujo la dirección e intensidad del campo magnético de un imán. Un método utilizado comúnmente es el de representar las fuerzas de un campo magnético mediante líneas colocadas arbitrariamente. Estas líneas representativas se llaman *líneas de fuerza.*

La figura 5-10 B muestra las líneas de fuerza trazadas para representar el campo magnético que rodea un imán. Si se estudian estas líneas, se puede ver que su forma general es similar a la obtenida mediante el "espolvoreo" de limaduras de hierro según la figura 5-10 A. Nótese que se han colocado flechas en cada una de las líneas de fuerza para indicar que salen del imán por el polo norte y entran por el polo sud, de manera que cada línea de fuerza forma un bucle cerrado. La dirección de estas líneas fue definida arbitrariamente por acuerdo universal, como la dirección que señala el polo norte de la aguja de una brújula cuando se coloca en cualquier punto a lo largo de las líneas de fuerza.

Con el propósito de explicar ciertos detalles del magnetismo, distintos autores utilizan términos diversos para distinguir entre las líneas de fuerza dentro y fuera del imán. Para los propósitos de este texto, esta diferenciación es innecesaria y así se refiera a las líneas dentro del imán o fuera del mismo, sólo se usará el término *líneas de fuerza magnéticas.*

En realidad, el campo magnético no existe sólo en un plano, sino que llena completamente el espacio que circunda al imán. Este campo se extiende a grandes distancias, y al menos teóricamente, por todo el espacio, con una intensidad del campo que va decreciendo muy rápidamente a medida que la distancia aumenta. La parte C de la figura 5-10 muestra cómo el campo magnético se extiende en todas direcciones alrededor de la barra magnética.

Aunque las líneas de fuerza son invisibles, tienen ciertas propiedades, que pueden ser resumidas como sigue:

1. Las líneas magnéticas de fuerza son continuas y siempre forman curvas cerradas.
2. Las líneas magnéticas presentan una fuerza a lo largo de la dirección de las mismas que tiende a acortarlas. Por lo tanto, cuando dos polos opuestos se aproximan, las líneas de fuerza exis-

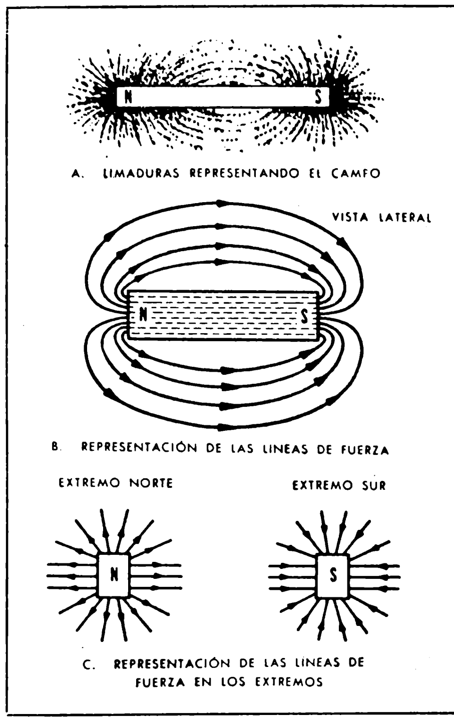


Figura 5-10. Campo magnético alrededor de un imán de barra

tentes entre ellos hacen que los polos se muevan uno hacia otro.

3. Las líneas magnéticas de fuerza nunca se cruzan entre ellas.
4. Las líneas de fuerza pasan por todos los materiales aunque no todos los materiales tienen propiedades magnéticas.
5. Las líneas de fuerza que tienen la misma dirección (por ejemplo aquellas que salen de polos iguales) tienden a apartarse una de otra.

Características de los campos magnéticos

Hasta ahora, sólo hemos considerado el campo magnético correspondiente a una única barra magnética. Tal caso es sólo uno de un ilimitado número de formas posibles que pueden producirse usando uno o más imanes. Por ejemplo, si acercamos el polo norte de una barra magnética al polo sur de otro imán, se obtendrá la forma indicada en la sección A de la figura 5-11. Nótese la similitud entre esta configuración y la configuración del campo magnético alrededor de una única barra magnética. En este caso el campo magnético contiene fuerzas de atracción entre dos polos opuestos. La intensidad del campo magnético es más grande cerca de los polos del imán, y decrece cuando la distancia de los polos aumenta.

La sección B de la figura 5-11, muestra la forma en que actúan las líneas de fuerza magnéticas para producir un campo magnético alrededor de dos polos iguales. En este caso, el campo magnético contiene fuerzas de repulsión. En el centro del espacio existente entre los polos de igual nombre hay un campo magnético de intensidad cero, porque la fuerza magnética producida por un polo es igual y opuesta a la fueza magnética producida por el otro polo. Las secciones C y D de la figura 5-11 muestran los resultados de colocar un tercer polo magnético dentro de los campos de polos opuestos y de igual nombre.

La figura 5-12 muestra el campo magnético asociado con un imán en forma de herradura. La traza formada por las limaduras es, en este caso, diferente de la traza alrededor de una barra debido a la oposición física de los polos con respecto al imán completo, y de un polo respecto del otro. Aunque el campo magnético tiene una configuración distinta para cada caso, mantiene las mismas características.

5-6 FORMAS Y USOS DE LOS IMANES

Los imanes y sus campos magnéticos son importantísimos en los equipos eléctricos y electrónicos. Debido a los muchos usos que tienen, se fabrican imanes temporarios y permanentes de variadas formas y tamaños. Las barras imantadas, imanes herraduras y anillos imantados constituyen los tres tipos de imanes fundamentales.

Barras imantadas

La barra imantada tiene su uso más común en el laboratorio, donde se la utiliza para estudiar los efectos del magnetismo. Las leyes de atracción y repulsión de los imanes pueden demostrarse adecuadamente mediante dicho tipo de imán.

La utilización de limaduras de hierro y de una barra imantada, permite obtener el espectro magnético de dicha barra, que demuestra la existencia del campo y las líneas de fuerza.

Cuando se desea obtener un campo más fuerte, se deben colocar dos o más imanes juntos. La figura 5-13 muestra este tipo de imán, llamado *imán compuesto.* Otro método para obtener un campo más potente consiste en construir el imán con varias tiras finas de material, en lugar de una gruesa. En la figura 5-14 puede verse dicho imán, llamado *imán laminado.* En realidad, el imán laminado es una forma de imán compuesto y, como en

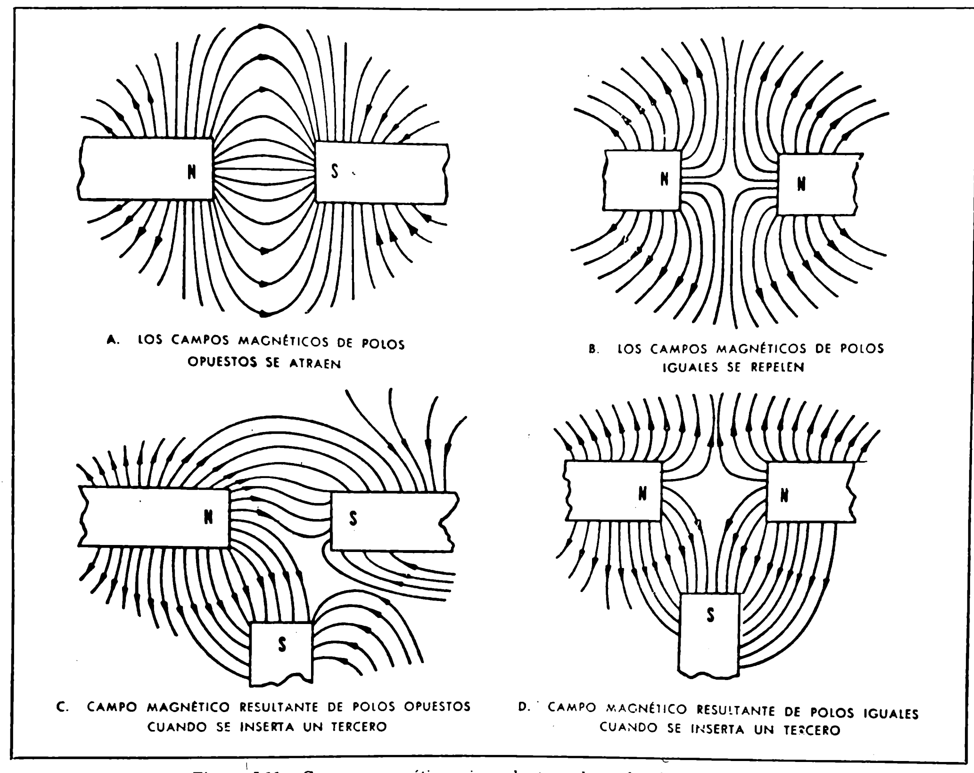


Figura 5-11. Campos magnéticos circundantes a los polos de imanes barra

todo imán compuesto, los polos del mismo signo deben ser colocados juntos.

Imanes en herradura

Los imanes usados en la mayoría de los equipos electrónicos tienen por lo general forma de herradura, o una variación de esta forma, porque proveen un campo magnético mucho más potente que un imán tipo barra de igual material. Este campo más potente resulta porque los polos están más juntos y, en consecuencia, se concentra el campo magnético en un espacio menor. Algunas de las variadas formas de imanes herradura se ilustran en la figura 5-15.

Así como en el caso de las barras magnéticas, se puede obtener un campo magnético más potente, colocando dos o más imanes herradura individuales juntos, formando un imán herradura compuesto. También los imanes herradura pueden ser laminados, para obtener un campo magnético más potente. Entre las aplicaciones específicas de los imanes herradura, se puede mencionar su uso en altoparlantes tipo bocina y en instrumentos de medida.

Anillos imantados

Otro tipo de imán usado en los equipos electrónicos es el imán en anillo. Se fabrica cuadrado o redondo, según se puede ver en la figura 5-16 (A y B). Obsérvese que dicho imán no tiene polos magnéticos ni campo magnético exterior puesto que las líneas de fuerza hacen su recorrido completo dentro del imán. Si se le corta un trozo, inmediatamente quedan establecidos un polo norte y un

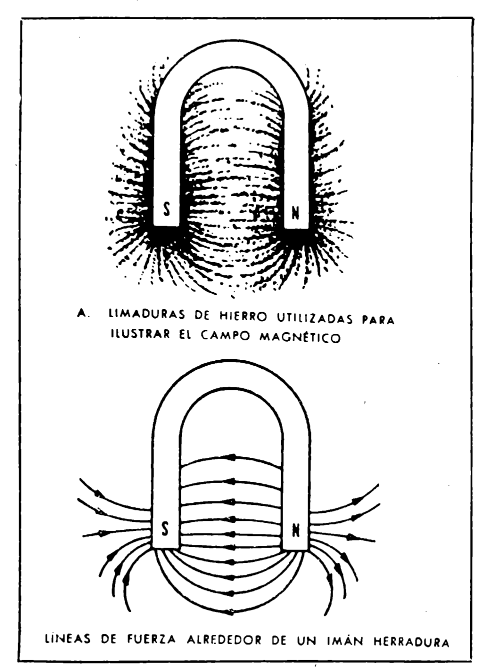


Figura 5-12. Campo magnético de un imán herradura

polo sur perfectamente definidos y el anillo magnético pasa a ser un imán herradura. El anillo imantado con una sección cortada que se ve en la figura 5-16 C, se utiliza con frecuencia en instrumentos de medición. Pueden también construirse con tiras delgadas de material, en lugar de hacerlo con una sola barra gruesa. Estos imanes que se llaman anillos magnéticos laminados, se usan con frecuencia como núcleos magnéticos de transformadores.

Se usan también para proteger de fuerzas magnéticas externas a instrumentos sensibles, como ser medidores y relojes. La figura 5-17 muestra cómo un anillo circular magnético actúa como blindaje magnético. El campo existente entre los polos del imán es deformado por el anillo de hierro, de manera que no pasan líneas de fuerza a través del objeto protegido. El anillo magnético, que es generalmente un imán temporario hecho de hierro dulce, provee un camino magnético a las líneas de fuerza y las hace apartarse del objeto a proteger. Como se estableció anteriormente, las líneas de fuerza atraviesan cualquier material; en con-

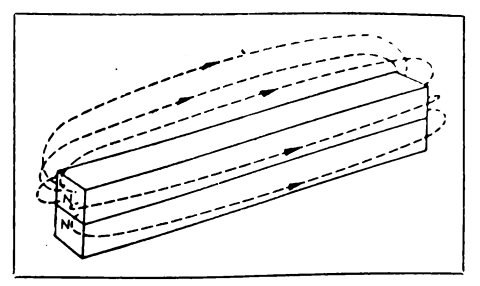


Figura 5-13. Campo magnético de un imán compuesto

secuencia, no hay aislador conocido para dichas líneas. Sin embargo, al proteger un objeto de un campo magnético, colocándolo dentro de un anillo de hierro dulce, se lo "aísla" efectivamente de dicho campo.

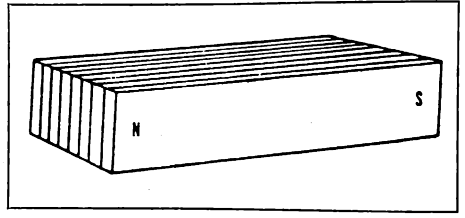


Figura 5-14. Imán laminado

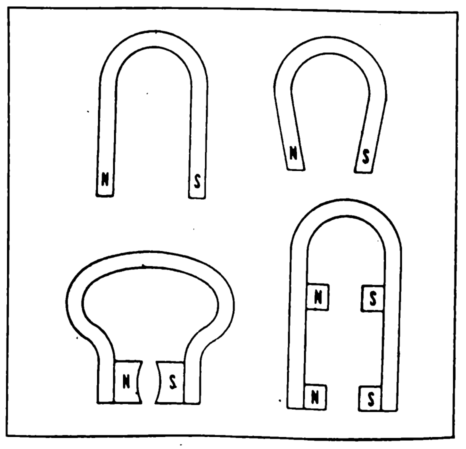


Figura 5-15. Formatos de imanes herradura

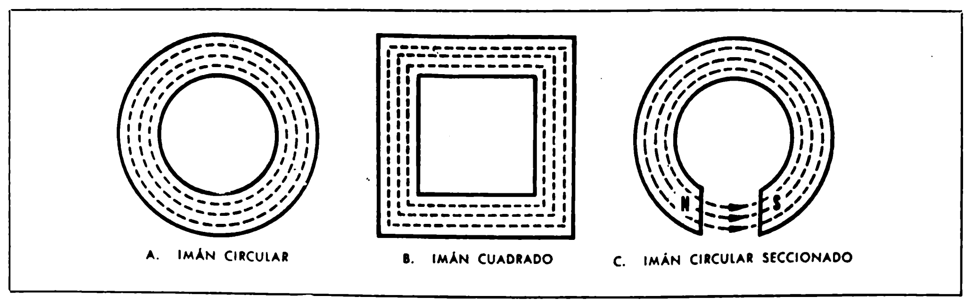


Figura 5-16. Formatos de imanes circulares

5-7 MANEJO Y CUIDADO DE LOS IMANES

Para prevenir la pérdida de magnetismo de los imanes permanentes y que en consecuencia se vuelvan inútiles, se debe tener cuidado en el manejo de los mismos y también en el manejo de los equipos que los contengan. El método apropiado para almacenar imanes permanentes es también un factor importante que debe tenerse en cuenta si se espera que tales imanes conserven su magnetismo.

Un pedazo de acero u otro metal que ha sido imantado puede ser desmagnetizado por una fuerza externa que altera la posición alineada de las moléculas. Si se golpea el imán con un martillo, se sacuden las moléculas, y este movimiento hace que vuelvan a su posición original desordenada. También el calentamiento del imán dilata el metal y permite a las moléculas volver a su posición original, desmagnetizándose. En consecuencia, los imanes nunca se deben dejar caer o colocar en lugares de alta temperatura.

El método apropiado para guardar los imanes permanentes es un factor muy importante. Cuando los imanes tipo barra no se utilizan, siempre deben guardarse de a pares, con sus puntas adyacentes unidas con polaridad opuesta, como se muestra en la parte A de la figura 5-18.

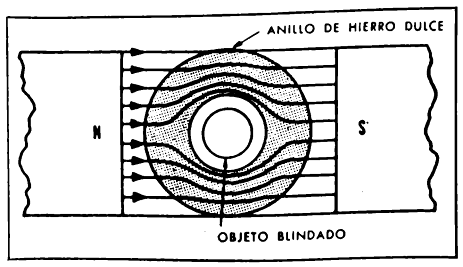


Figura 5-17. Imán circular utilizado como blindaje magnético

Cuando los imanes herradura no se usan, debe colocarse sobre los polos una barra de hierro dulce, llamada armadura, para evitar pérdida de flujo magnético. Véase la parte B de la figura 5-18. Nótese que el flujo pasa del polo norte al polo sur del imán por el paso permeable de la armadura de hierro dulce, reduciendo así la pérdida de flujo a un mínimo. Así, el magnetismo del imán herradura se conserva mediante el uso de la armadura.

Ninguna precaución especial se requiere para guardar los imanes anillo, pues no tienen polos ni campo magnético externo. Sin embargo, estos imanes, como todos los otros imanes, no deben ser sacudidos ni sometidos a altas temperaturas.

5-8 RESUMEN DEL MAGNETISMO

En este capítulo se han estudiado, hasta el presente, el magnetismo, los imanes, y la fuerza magnética en lo que se refiere al efecto visible que la fuerza magnética tiene sobre los materiales magnéticos.

La eoría más común del magnetismo es la teoría de Weber, más comúnmente llamada teoría molecular del magnetismo. Esta teoría se basa en la suposición de que todas las moléculas de un material magnético son imanes individuales. Cuando todos los imanes moleculares están alineados en la misma dirección, se dice que el imán está saturado. La ley fundamental del magnetismo establece que los polos iguales se repelen y los polos magnéticos opuestos se atraen.

Se define un campo magnético como la región donde actúan las fuerzas magnéticas. El campo magnético se caracteriza por fuerzas que varían en intensidad y dirección de un punto a otro punto dentro del campo. Gráficamente, los campos mag-

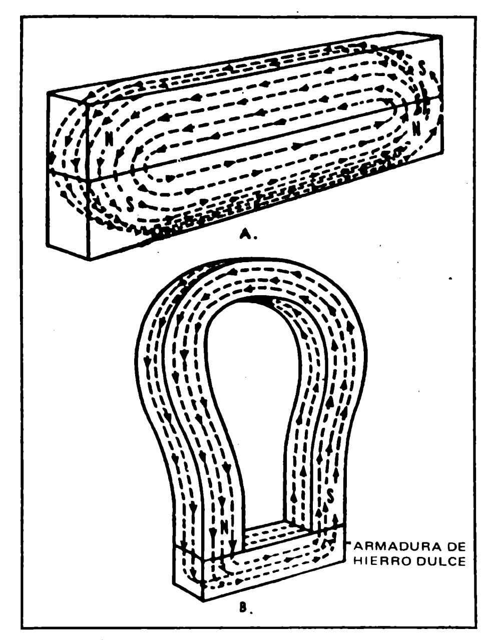


Figura 5-18. Método apropiado para almacenar imanes barra y herradura

néticos se representan comúnmente por líneas de fuerza. Aunque las líneas de fuerza magnética son invisibles, tienen ciertas propiedades que las caracterizan.

5-9 . ELECTROMAGNETISMO

El magnetismo y los efectos magnéticos producidos por el paso de una corriente eléctrica por un conductor es un fenómeno que se llama *electromagnetismo*. Antiguamente, los hombres de ciencia estudiaron el magnetismo experimentando sólo con imanes permanentes. Por esta razón, se consideró el magnetismo como una ciencia diferente de la ciencia de la electricidad, aunque se conocía algunos hechos de ambas ciencias desde tiempos antiguos. Fue en el año 1820 cuando Hans Christian Oersted, nacido en Dinamarca y profesor de física en la Universidad de Copenhague, descubrió que había una relación directa entre fuerza magnética y fuerza eléctrica.

Anteriormente al año 1820, Oersted creía haber probado que no había relación entre electricidad y magnetismo. Acostumbraba a conectar un conductor de alambre a una pila de Volta, colocándolo en ángulo recto y encima de una brújula. Con el conductor en esa posición, no había movimiento de la brújula. Sin embargo, un día mientras discutía el experimento con sus alumnos, colocó el conductor portador de corriente paralelo a la brújula. La aguja giró y se colocó en ángulo recto con el conductor. Al continuar sus experimentos, Oersted encontró que si se invertía la corriente en el conductor, la aguja giraba en ángulo recto hacia la dirección opuesta. Por medio de estos experimentos, Oersted comprobó que un alambre conductor de una corriente eléctrica tiene a su alrededor un campo de fuerza que actúa sobre una brújula, de manera similar al campo de fuerza que tiene a su alrededor un imán permanente.

Campo magnético alrededor de un conductor

Toda vez que un conductor de electricidad se somete al pasaje de una corriente, se forma un campo magnético en su derredor. Este hecho puede probarse pasando un alambre a través de un pedazo de cartón que se ha espolvoreado con limaduras de hierro, como se muestra en la figura 5-19. Cuando fluye corriente por el alambre, las líneas de fuerza magnética que circundan al mismo, harán que las limaduras formen curvas cerradas alrededor del alambre. Si se coloca una brújula en distintos lugares del campo magnético, el movimiento de la aguja mostrará que las líneas de fuerza magnética tiene un sentido definido. El sentido de las líneas depende del sentido del flujo de la corriente en el conductor.

El campo magnético producido por una corriente eléctrica *siempre* está en ángulo recto con la corriente que lo produce. Como consecuencia de tener el campo magnético intensidad y dirección, las líneas de fuerza en la figura 5-19 se ven más concentradas cerca del conductor, y gradualmente más raleadas a medida que se alejan del conductor.

Teóricamente, el campo magnético de cualquier imán se extiende por todo el espacio. Si la brújula

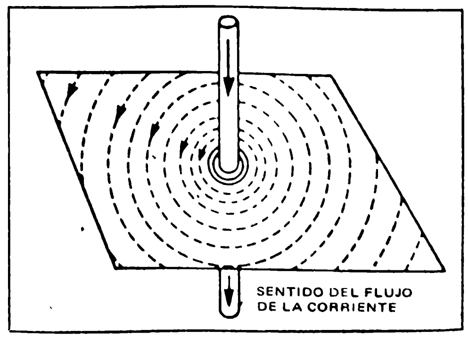


Figura 5-19. Líneas magnéticas de fuerza alrededor de un conductor

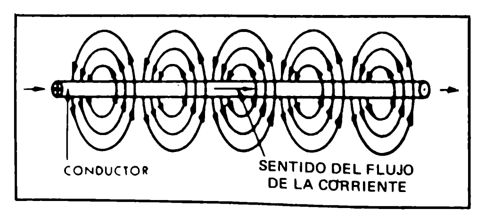


Figura 5-20. Campo magnético a lo largo de un conductor

utilizada para indicar el sentido del campo magnético se aleja del conductor, llegaría a un punto en donde el efecto del campo no se sentiría más. Si se aumenta entonces la corriente por el conductor, otra vez sería afectada la aguja e indicaría el sentido del campo magnético. De esta comprobación, resulta evidente que la fuerza o intensidad de un campo magnético alrededor de un conductor de electricidad, aumenta cuando aumenta la corriente y decrece cuando decrece la corriente. En forma similar a la fuerza del campo de un imán permanente, la intensidad del campo magnético de un conductor eléctrico varía inversamente con la distancia. La relación matemática entre corriente, fuerza del campo y distancia queda expresada por la ecuación:

$$H = \frac{2I}{d^2} \qquad (5\text{-}3)$$

donde:

H = intensidad del campo magnético.
I = corriente que fluje por el conductor.
d = distancia perpendicular del conductor al punto donde el campo magnético será medido.

Se emplea d^2 cuando se busca la fuerza del campo alrededor de un conductor corto y recto. Para un conductor largo y recto en las condiciones apuntadas más arriba, no se utiliza d^2 en la ecuación, sino d.

En realidad, el campo magnético alrededor de un conductor no queda limitado al plano único que se ilustra en la figura 5-19, sino que existen planos similares en toda sección del conductor. La figura 5-20 muestra el campo magnético que se extiende a lo largo del conductor, con las líneas de fuerza indicando el sentido del campo.

Regla de la mano izquierda para determinar el sentido de la corriente en un conductor y la de su campo

Después del descubrimiento de la relación entre el sentido de la corriente por un alambre y el sentido del campo magnético causado por la misma, se estableció una regla sencilla para determinar el sentido del campo magnético alrededor de un conductor de electricidad. Esta regla, conocida como la regla de la mano izquierda, está basada en la moderna teoría del flujo de la corriente. La regla de la mano izquierda establece lo siguiente: *Si se aprisiona el conductor dentro de la mano izquierda, con el dedo pulgar apuntando en la dirección del flujo de la corriente, la dirección de los dedos indicará el sentido de las líneas magnéticas de fuerza.*

Con esta regla, y conociendo el sentido del campo o el sentido de la corriente, puede obtenerse la otra dirección, como se muestra en la figura 5-21.

En la sección A de la figura 5-22 se muestra la corriente que fluye por el conductor en dirección ascendente. Si se aplica la regla de la mano izquierda, como se indica más arriba, se puede ver que el campo tiene un sentido igual al del movimiento de las agujas de un reloj. La figura 5-22 parte C, muestra un corte transversal de un conductor que tiene un campo magnético en el sentido de las agujas del reloj. En esta figura (parte A), la corriente fluye en el conductor hacia afuera de la página, como se indica por el símbolo ⊙ que representa la punta de una flecha. Al aplicar la ley de la mano izquierda se puede ver que el campo mostrado en las partes A y C de la figura tiene el mismo sentido. En la figura 5-22, D, se ve el extremo del conductor mostrando la corriente que fluye hacia adentro de la página.

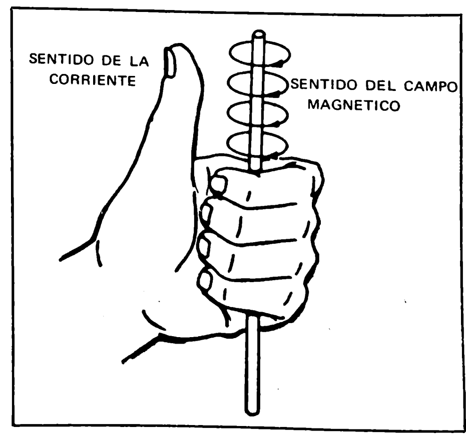


Figura 5-21. Regla de la mano izquierda para conductores

En este caso el símbolo ⊕ representa la cola de la flecha. Nótese ahora que las flechas en las líneas de fuerza muestran que el sentido del campo magnético es contrario al de las agujas del reloj, en forma similar al campo mostrado en la parte B.

Campo magnético alrededor de dos conductores

Los campos magnéticos formados por corrientes eléctricas en conductores separados producen atracción o repulsión entre éstos, según sea la dirección del flujo de la corriente en los conductores individuales. Los efectos de corrientes paralelas que fluyen en el mismo sentido pueden observarse en las partes A y B de la figura 5-23. La parte A muestra una vista lateral de los conductores y la parte B, una vista del corte transversal de los mismos conductores. En el área entre los conductores, las líneas de fuerza se oponen mutuamente debilitándose el campo resultante, mientras que en el área fuera de los conductores el campo se fortalece. Como consecuencia del campo debilitado las líneas de fuerza tienden a circular alrededor de los dos conductores, y los mismos se atraen mutuamente en la dirección de las flechas A y B. En consecuencia, se puede establecer que las corrientes paralelas que fluyen en el mismo sentido causan atracción mutua.

Las partes C y D de la figura 5-23 muestran los

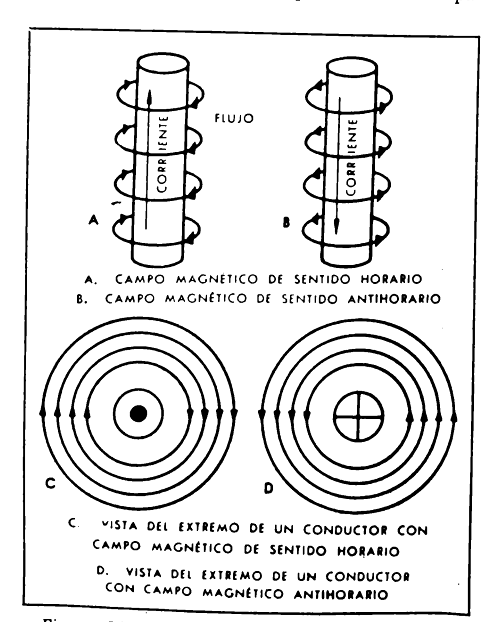


Figura 5-22. Campos magnéticos de conductores y su representación

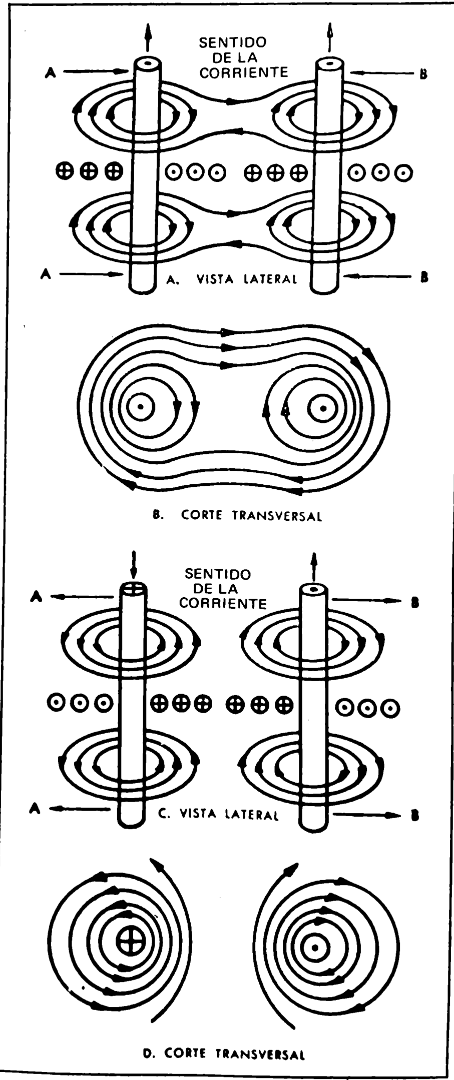


Figura 5-23. Campo magnético alrededor de dos conductores conduciendo corriente en el mismo sentido y en sentido opuestos

efectos de corrientes paralelas que fluyen en sentidos opuestos. Por aplicación de la regla de la mano izquierda, el sentido de las líneas de fuerza indica que los dos campos magnéticos se ayudan mutuamente en la región situada entre los conductores (parte C.). Puesto que este campo se ve ahora fortificado, comparado con el campo fuera de los conductores, tiende a separar los conductores como se ve por la dirección de las flechas, A y B. Se puede establecer, en consecuencia, que corrientes paralelas que fluyen en sentidos opuestos causan repulsión mutua.

En la figura 5-24 se muestra el campo magnético, y los efectos de dicho campo, de dos conductores de corriente situados en ángulo recto. Si se aplica a cada uno de los conductores la regla de la mano izquierda, el campo magnético indicado por las líneas de fuerza en los cuadrantes M y N, será similar al campo magnético situado entre los conductores en la parte A de la figura 5-23. Esto significa que el campo en los cuadrantes M y N resultará debilitado. Por la misma razón, cuando se compara el campo en los cuadrantes O y P con el campo situado entre los conductores en la parte C de la figura 5-23, las líneas de fuerza indican que el campo magnético en esos cuadrantes resulta reforzado. Como consecuencia de los efectos del campo magnético en los cuadrantes M y N y en los cuadrantes O y P, los dos conductores tienden a moverse hacia una posición paralela, con los extremos de los conductores en la dirección de las flechas A y B. Nótese que entonces la corriente

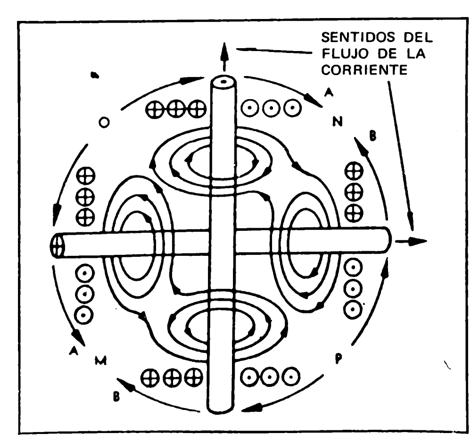


Figura 5-24. Campo magnético alrededor de dos conductores a 90°

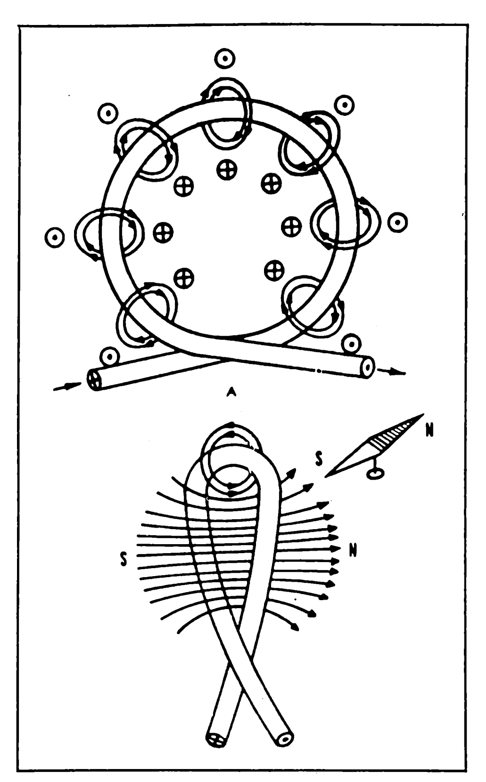


Figura 5-25. Líneas magnéticas de fuerza alrededor de una espira de alambre

fluye en el mismo sentido en los dos conductores. En consecuencia, las corrientes que fluyen por conductores ubicados en ángulo recto producen campos magnéticos que tienden a forzar a dichos conductores a tomar una posición paralela y con sus corrientes fluyendo en el mismo sentido.

Los efectos de los campos magnéticos alrededor de dos conductores de corriente, ya sea que éstas fluyan en el mismo sentido o en sentidos opuestos, o que los conductores estén situados en ángulos rectos, pueden resumirse en el siguiente enunciado: "Un conductor de corriente siempre tiende a moverse de un campo magnético potente a un campo magnético débil, y el sentido del movimiento es la resultante de las fuerzas que producen todos los campos magnéticos que actúan sobre el conductor".

Campo magnético alrededor de una simple espira o lazo de alambre

Si se dobla un conductor de corriente recto en forma de espira o lazo, las mismas líneas circulares de fuerza o del campo magnético circundan el conductor como cuando era rectilíneo. La figura 5-25 muestra en A, el campo magnético formado alrededor de una espira de alambre. Puede verse la similitud entre el campo alrededor de un lazo único y el campo magnético alrededor de un conductor de alambre recto, comparando la figura 5-25 con la figura 5-20. Nótese que cuando el conductor se transforma en espira, todas las líneas de fuerza entran por un lado de la espira y salen por el otro. Esto coincide con la regla de la mano izquierda, y puede verse en la parte B de la figura 5-25. En consecuencia, la espira de alambre actúa como un imán, con un polo norte de un lado de la espira y un polo sur del otro lado. Esta situación se comprueba por la posición de la brújula en la figura.

Campo magnético alrededor de una bobina de alambre

Cuando se arrollan varias espiras o vueltas de alambre para formar una bobina, se obtiene una *hélice o solenoide*. En realidad, cualquier bobina de alambre es una hélice, mientras que un solenoide es una bobina que tiene considerable longitud, comparada con su diámetro.

La figura 5-26, parte A, muestra el campo magnético circundante de un solenoide con arrollamiento espaciado. Puesto que la corriente fluye en el mismo sentido en todas las espiras, el campo magnético producido entre las espiras es similar a aquél de conductores paralelos que tienen corrientes que fluyen en el mismo sentido. En consecuencia, el campo entre las vueltas individuales resulta debilitado por la oposición del flujo entre las vueltas, ocurriendo que algunas de las líneas de fuerza envuelven a varias espiras del solenoide y aun a éste entero. Estas líneas de fuerza producen un campo magnético que es similar al campo magnético de un imán tipo barra, estableciéndose un polo norte de un extremo del solenoide y un polo sur en el otro.

La figura 5-26 (parte A) muestra, a través del estudio del sentido de las líneas de fuerza magnéticas la manera en que se produce un campo magnético alrededor de un solenoide. En el conductor superior de cada espira del solenoide, la corriente fluye en sentido hacia afuera del papel y produce un campo magnético alrededor del conductor en el sentido del movimiento de las agujas del reloj. Puesto que los conductores adyacentes superiores

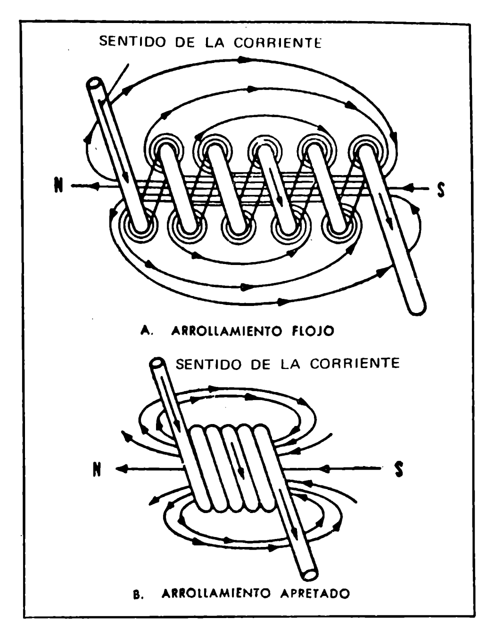


Figura 5-26. Campos magnéticos alrededor de bobinas apretadas y flojas

tienen campos magnéticos del mismo sentido, estos campos individuales se combinan para formar un campo magnético continuo, con el sentido de las agujas del reloj. En el conductor inferior de cada espira del solenoide, la corriente fluye en sentido opuesto a la corriente en los conductores superiores; en consecuencia, los campos magnéticos alrededor de los conductores inferiores se combinan para formar un campo magnético continuo e inverso al sentido de las agujas del reloj.

Si las espiras del solenoide se acercan lo más posible entre sí, como se muestra en la parte B de la figura 5-26, el solenoide queda envuelto por muchas más líneas de fuerza. Por esta razón, el campo magnético dentro de la bobina y en los polos es mucho más potente que el campo de un solenoide arrollado en forma espaciada, puesto que prácticamente todas las líneas de fuerza que antes envolvían las espiras individuales rodean ahora por entero al solenoide. Por lo tanto, mientras fluya corriente, el solenoide tiene las propiedades de un imán permanente.

La regla de la mano izquierda, que se emplea para determinar el sentido del campo magnéti-

co circundante de un conductor de electricidad recto, puede también aplicarse para determinar el sentido del campo magnético circundante de un solenoide o bobina. Esta regla de la mano izquierda, que se representa en la figura 5-27, establece lo siguiente: *"Aprisiónese el solenoide (o bobina) con la mano izquierda, de manera que los dedos sigan con sus extremos el sentido del flujo de la corriente alrededor de la bobina; extiéndase el pulgar en ángulo recto con los dedos, y el pulgar entonces apuntará en el sentido del polo norte".*

Electroimanes

Si se coloca un pedazo de material magnético, por lo general hierro dulce, dentro del solenoide, las propiedades magnéticas de éste resultan muy aumentadas. Este aumento de fuerza magnética se debe al mejor paso o conducción que el hierro dulce provee a las líneas de fuerza con respecto al aire. El interior de cualquier bobina se llama *núcleo* del imán, ya sea de aire o de un material magnético. Si se arrolla la bobina a un núcleo de material magnético, el conjunto se denomina *electroimán.*

Un ejemplo típico de electroimán se muestra en la figura 5-28. La bobina puede arrollarse con una o más capas de alambre que se extienden de un extremo del núcleo al otro, pero siempre que la corriente fluya alrededor del núcleo continuamente y en la misma dirección. También se usa la regla de la mano izquierda para determinar el sentido del campo magnético de un electroimán.

5-10 CIRCUITOS MAGNÉTICOS

El camino que toman las líneas de fuerza magnéticas (flujo), ya sea por el aire o por un material magnético, recibe el nombre de *circuito magnético.* Las leyes que se aplican a los circuitos magnéticos son similares (pero no las mismas) que las de los



Figura 5-27. Regla de la mano izquierda para solenoides

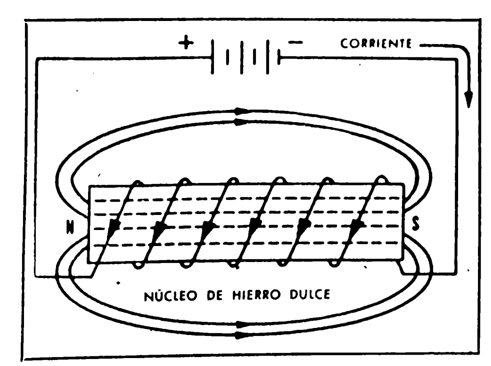


Figura 5-28. Electroimán tipo

circuitos eléctricos. Para obtener una mayor comprensión de los circuitos magnéticos, los párrafos siguientes comparan las propiedades de un circuito magnético con las de un circuito eléctrico.

Comparación de las propiedades de los circuitos eléctricos y magnéticos

El movimiento de los electrones de un átomo a otro ha sido definido como una corriente. La relación entre corriente, tensión y resistencia de los circuitos eléctricos se expresa matemáticamente por la ley de Ohm. Son comparables a la corriente, tensión y resistencia de los circuitos eléctricos, el flujo de líneas magnéticas, la fuerza magnetomotriz y la reluctancia, respectivamente, de los circuitos magnéticos. El *flujo* de un circuito magnético es el total de líneas de fuerza magnética dentro o alrededor del mismo. La energía requerida para producir un flujo magnético por un circuito magnético se llama *fuerza magnetomotriz,* o fmm.

Las unidades de medida del *flujo magnético* (designado por la letra griega ϕ), y de la *fuerza magnetomotriz* (designada por la letra **F**) son el *maxwell* y el *gilbert,* respectivamente.

La resistencia que se opone al flujo en un circuito magnético se llama *reluctancia.* Similar a la resistencia en los circuitos eléctricos, la reluctancia de un material magnético se designa por la letra R; pero al contrario de la resistencia eléctrica, no es un valor constante para un determinado material. En efecto, la reluctancia varía con la densidad del flujo del material (el número de líneas de flujo por unidad de superficie). No se ha dado un nombre a la unidad de medida de la reluctancia. Las relaciones entre flujo, fuerza magnetomotriz y reluctancia de los circuitos magnéticos se expresan matemáticamente por los equivalentes de la

ley de Ohm para circuitos magnéticos. En consecuencia:

$$F = \phi R;\ \phi = \frac{F}{R};\ R = \frac{F}{\Phi} \qquad (5\text{-}4)$$

La tabla 5-1 y la figura 5-29 muestran una comparación de la corriente, tensión y resistencia en circuitos eléctricos, y el flujo, fmm, y reluctancia en circuitos magnéticos. Es evidente que, en los dos tipos de circuitos, el resultado producido (corriente o flujo) es directamente proporcional a la fuerza que lo produce (tensión o fmm), e inversamente proporcional a la oposición encontrada (resistencia o reluctancia). Igualmente, las diferencias más importantes entre las propiedades del circuito eléctrico y las del circuito magnético son las siguientes:

1. En el circuito eléctrico la resistencia es constante y puede determinarse en base a la relación de tensión a corriente en el circuito. En cambio, en el circuito magnético, la reluctancia no es constante y depende de la intensidad del campo magnético.
2. En los circuitos eléctricos, la corriente fluye realmente desde un punto hasta otro (movimiento de electrones). En el circuito magnético, el flujo no fluye en realidad: las líneas de fuerza son meramente una indicación de la intensidad (dada por la intensidad del flujo por unidad de área) y de la dirección del campo magnético.

TABLA 5-1. COMPARACION ENTRE PROPIEDADES ELÉCTRICAS Y MAGNÉTICAS DEL CIRCUITO

Circuitos eléctricos		
Propiedad	Símbolo	Ecuación de la ley de ohm
Tensión	E	$E = IR$
Corriente	I	$I = \frac{E}{R}$
Resistencia	R	$R = \frac{E}{I}$

Circuitos magnéticos		
Propiedad	Símbolo	Ecuación de la ley de ohm
Fuerza magnetomotriz	F	$F = \phi R$
Flujo	ϕ	$\phi = \frac{F}{R}$
Reluctancia	R	$R = \frac{F}{\phi}$

Fuerza magnetomotriz (fmm)

La fuerza requerida para producir un flujo magnético en un circuito magnético se denomina fuerza magnetomotriz, o fmm. Un gilbert de fmm es igual a la presión magnética requerida para producir una línea de fuerza en un circuito magnético que tiene una unidad de reluctancia. Si la oposición ofrecida por el circuito magnético al flujo se mantiene constante, la cantidad de flujo dependerá solamente de la cantidad de fuerza magnetomotriz aplicada.

Cuando se estudia un circuito magnético, es necesario considerar la longitud del material magnético para determinar la influencia de la fmm sobre el circuito. La fuerza magnetomotriz por unidad de longitud de un circuito magnético se llama *intensidad de campo magnético* y se identifica por el símbolo H. Cuando la longitud del circuito magnético se mide en centímetros y la fmm se expresa en gilbert, la unidad de intensidad de campo es el oersted. Para estos propósitos, el oersted se define como un gilbert por centímetro de largo del

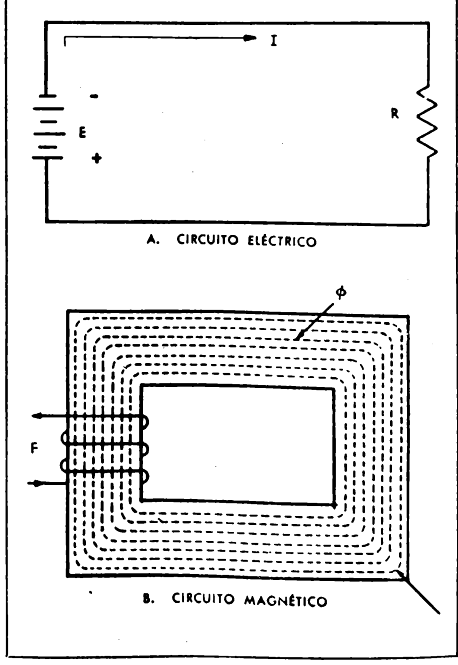


Figura 5-29. Comparación entre circuitos eléctricos y magnéticos

circuito magnético. La intensidad de magnetización (H), cuando se mide con respecto a la fuerza magnetomotriz (F) y la longitud (L) de un circuito magnético, se expresa matemáticamente por la ecuación:

$$H = \frac{F}{L} \qquad (5\text{-}5)$$

Donde:

F = fuerza magnetomotriz.

L = longitud del circuito magnetizante, en centímetros.

H = intensidad de campo magnético, en oersted.

La ecuación (5-5) puede ser resuelta para F, resultando:

$$F = HL \qquad (5\text{-}6)$$

En consecuencia, puede determinarse la fuerza magnetomotriz requerida para producir un determinado flujo en un circuito magnético, cuando se conocen la intensidad de campo y la longitud del circuito magnético. Por ejemplo, puede usarse la ecuación 5-6 para determinar la fuerza magnetomotriz requerida para producir una intensidad de campo de 1.000 oersted en un circuito magnético de 50 cm de largo, como sigue:

$$F = HL$$

Sustituyendo:

$$F = 1.000 \times 50$$

En consecuencia:

$$F = 50.000 \text{ gilbert}$$

Toda vez que circule corriente por un solenoide, o bobina de alambre, se produce una fuerza magnetomotriz. En consecuencia, en un electroimán se crea una intensidad de campo, al circular una corriente eléctrica por su solenoide, que está arrollado sobre una parte del circuito magnético. Puesto que la fuerza del campo magnético en el conductor crece cuando la corriente por el conductor aumenta, el campo magnético en el solenoide también crece cuando la corriente aumenta en el solenoide. En realidad, para cualquier bobina, duplicando la corriente se duplica la fuerza del campo magnético. Además, como el total del campo magnético alrededor de la bobina es igual a la suma de los campos de las vueltas o espiras individuales, un aumento en el número de vueltas aumenta la intensidad de todo el campo magnético. Es por eso que la cantidad de flujo (líneas de fuerza) alrededor del solenoide, ya tenga éste un núcleo de aire o de hierro, es proporcional a la corriente que fluye en la bobina y al número de vueltas electromagnéticas de la bobina. El término *vuelta electromagnética* en este caso significa una vuelta del conductor alrededor del núcleo del electroimán. Se entenderá mejor el significado de vuelta electromagnética si se consulta la figura 5-30.

La fuerza magnetomotriz de un electroimán de una longitud diez veces mayor que su diámetro, es igual al producto de la corriente que pasa por la bobina (en empere), por el número de vueltas, y por una constante (1,26). Se expresa matemáticamente por la ecuación:

$$F = 1{,}26 \; NI \qquad (5\text{-}7)$$

donde:

F = fuerza magnetomotriz, en gilbert.

N = número de vueltas de la bobina.

I = corriente que fluye por la bobina, en ampere.

1,26 = una constante, derivada de un factor proporcional longitud-diámetro.

Para calcular la fuerza magnetomotriz que podrá producir un electroimán que tiene una bobina de 200 vueltas y 0,5 ampere de corriente en su bobina, se aplica la fórmula anterior:

$$F = 1{,}26 \; NI$$

Sustituyendo:

$$F = 1{,}26 \times 200 \times 0{,}5$$

En consecuencia:

$$F = 126 \text{ gilbert}$$

Cuando la longitud del solenoide es menor que 10 veces su diámetro, puede despreciarse el factor

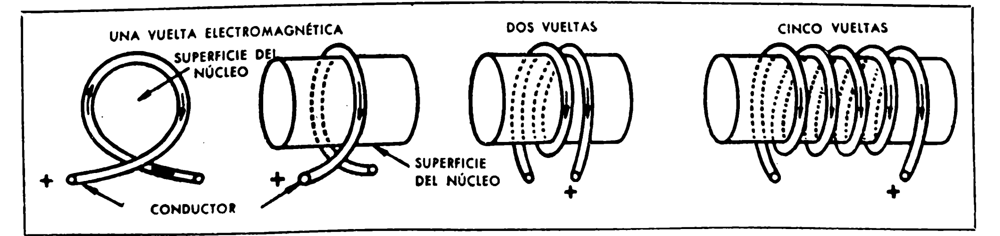


Figura 5-30. Vueltas electromagnéticas

numérico de 1,26. En este caso, la fuerza magnetomotriz es igual al producto del número de vueltas por la corriente en la bobina.

Como en la definición de la unidad de fuerza magnetomotriz, se utiliza la denominación *ampere-vuelta* en lugar de gilbert, y la expresión matemática se convierte ahora en:

$$F = NI \qquad (5\text{-}8)$$

donde:

F = fuerza magnetomotriz, en ampere-vueltas.
N e I = igual que lo definido en 5-7.

Según lo expuesto, cuando la longitud del circuito magnético se mide en cm, y la fuerza magnetomotriz se expresa en gilbert, la unidad de intensidad de campo es el oersted. Sin embargo, si la longitud del circuito magnético se mide en pulgadas, y la fmm (fuerza magnetomotriz) se expresa en ampere-vueltas, la unidad de intensidad de campo se expresa en *ampere-vueltas por pulgada.*

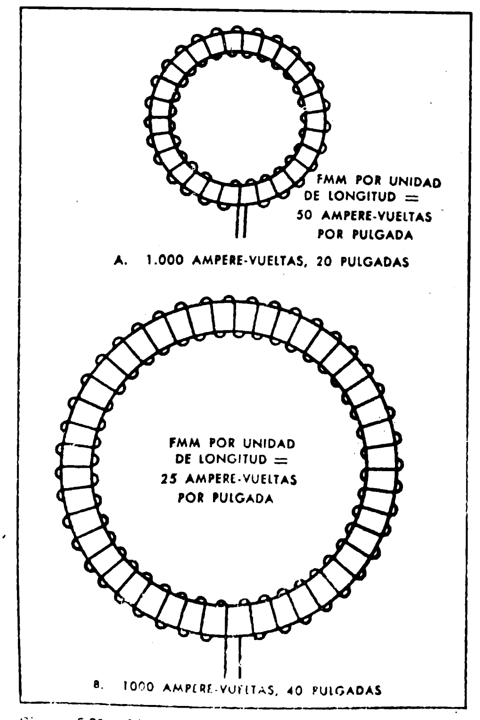


Figura 5-31. Circuitos magnéticos de distintas longitudes con la misma fuerza magnetomotriz

Cuando se estudia un circuito magnético, debe considerarse la longitud del paso magnético para determinar la influencia de la fuerza magnetomotriz en el circuito. La figura 5-31 muestra dos circuitos magnéticos en distintas longitudes, consistentes en bobinas arrolladas en núcleos circulares de hierro. En estos dos circuitos magnéticos el total de fuerza magnetomotriz es el mismo: 1.000 ampere-vueltas. La longitud del núcleo de hierro en la parte A de la figura es de 20 pulgadas, en cambio la longitud del núcleo de hierro en la parte B es de 40 pulgadas. Cuando la intensidad de campo (fmm por unidad de longitud) se calcula para ambos circuitos mediante la ecuación $H = \frac{F}{L}$, se verá que el circuito posee en A una intensidad de campo de 50 ampere-vueltas por pulgada (1000/20 = 50), y en la parte B se observará una intensidad de campo de 25 ampere-vueltas por pulgada (1000/40 = 25). De ello se deduce que la intensidad de campo en un circuito magnético decrece, según aumenta la longitud del mismo.

Curva de magnetización

La densidad de flujo de un material magnético depende de la conductibilidad magnética del mismo, y del valor de la intensidad de campo o fuerza magnética. En los materiales no magnéticos, cualquier variación de la intensidad de campo produce una variación proporcional de la densidad del flujo; no así en los materiales magnéticos, en los que la densidad de flujo no varía en proporción a la fuerza magnética o intensidad de campo. La forma en que la intensidad de campo afecta la densidad del flujo en los materiales magnéticos depende del tipo de materiales de esta clase que se utilice.

Los cálculos para un circuito magnético pueden simplificarse mediante el uso de la curva de imantación, para cada material usado. Una *curva de magnetización* como la ilustrada en la figura 5-32, muestra el efecto de todo cambio de la intensidad de campo, en la densidad de flujo de un material magnético. Debido a que la densidad de flujo (B) se opone a la intensidad de campo (H), tal curva es también conocida como *"Curva B-H"*. La intensidad de campo, expresada en ampere-vueltas por pulgada, está indicada en el eje horizontal, aumentando desde cero en una relación constante. El total de la densidad de flujo, expresado en kilolíneas (miles de líneas) por pulgada, se indica en el eje vertical. (Cuando se expresa en líneas por centímetro cuadrado, la unidad de densidad de flujo es el *gauss.*).

El examen de la curva muestra que, según aumenta la fuerza magnética, varía el aumento correspondiente de la densidad de flujo. En la región inferior de la intensidad de campo, entre 0 y 4 ampere-vueltas por pulgada, la densidad de flujo aumenta en una relación comparativamente baja. Esto es debido a la incapacidad de la débil intensidad de campo para vencer la resistencia ofrecida por la fricción de las moléculas del material. En la región entre 4 y 20 ampere-vueltas por pulgada, la curva es casi lineal, indicando que la fuerza magnética ha vencido dicha resistencia, y que las moléculas responden al aumento de dicha fuerza, en una relación de incremento casi constante. En esta región, la densidad de flujo aumenta desde 10 kilolíneas por pulgada cuadrada, hasta 78 kilolíneas por pulgada cuadrada. Con un valor superior a 20 ampere-vueltas por pulgada, la densidad de flujo aumenta en una relación menor, hasta alcanzar un punto en que ya no aumenta, sea cual fuere el incremento de la intensidad de campo. Por ejemplo, 20 ampere-vueltas por pulgada producen 78.000 líneas de fuerza por pulgada cuadrada, mientras que 100 ampere-vueltas, o sea 5 veces más fuerza magnética, producen sólo 101.000 líneas por pulgada cuadrada.

El punto donde la curva empieza a achatarse se llama *codo* o *rodilla* de la misma. El punto situado por encima del codo a partir del cual no hay incremento de flujo, sea cual fuere el aumento de fuerza magnética, se llama *punto de saturación*. En circuitos de radio, generalmente es deseable que la densidad de flujo permanezca bajo el codo, de manera tal que una variación de la intensidad de campo produzca una variación más o menos proporcional en la densidad de flujo.

La relación de permeabilidad de un material magnético puede apreciarse mediante la utilización de una curva de magnetización, o BH. La *relación de permeabilidad* magnética, indicada con el símbolo μ es igual a la densidad de flujo (B) dividida por la intensidad de campo (H). O sea:

$$\mu = \frac{B}{H} \qquad (5\text{-}9)$$

En la figura 5-32, la línea de puntos indica que la densidad de flujo será de 85.000 líneas de fuerza por pulgada cuadrada, para una fuerza magnética de 25 ampere-vueltas por pulgada. Sustituyendo estos valores en la ecuación de la permeabilidad y resolviendo para μ vemos que: $\mu = 3400$ $(85.000/25 = 3400)$. Por lo tanto, el material magnético elegido en este ejemplo, conducirá las líneas de fuerza 3400 veces más fácilmente que el aire.

La misma curva de magnetización no puede usarse para todos los materiales magnéticos. En realidad, cada tipo de material tiene su curva y no hay dos curvas exactamente iguales, pues la densidad del flujo no varía en proporción a la intensidad de campo.

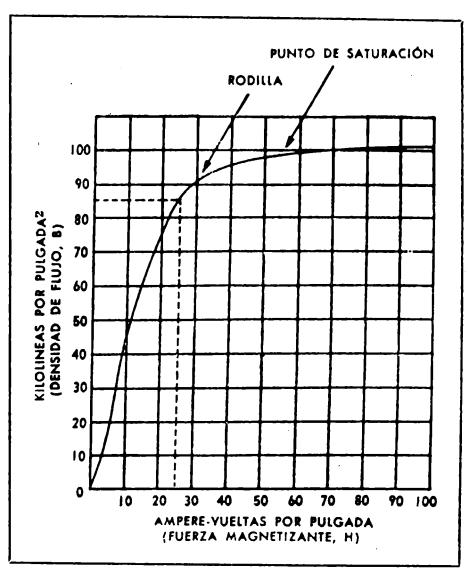


Figura 5-32. Curva de magnetización (curva B-H) de un material magnético tipo

Cálculo del flujo magnético

Aunque se usan varios sistemas de unidades en el cálculo de los circuitos magnéticos, el más simple y de mayor empleo es el sistema mixto inglés. En este sistema, la unidad de intensidad de campo es el ampere-vuelta por pulgada; la densidad de flujo está en líneas por pulgada cuadrada y el flujo total, en cantidad de líneas de fuerza.

Después de calcular el valor de la intensidad de campo en ampere-vuelta por pulgada (usando la ecuación $H = NI/L$), puede determinarse fácilmente con la curva B-H la densidad de flujo en un núcleo. Una vez determinado el valor de la densidad de flujo (B), puede calcularse el flujo total en un circuito magnético usando la ecuación:

$$\Phi = BA \qquad (5\text{-}10)$$

donde:

B = densidad de flujo, en líneas por pulgada cuadrada.

A = sección transversal del núcleo, en pulgada cuadrada.

Φ = flujo magnético total, en líneas de fuerza.

Como ejemplo, considérese una bobina de alambre con 200 vueltas, de una longitud de 20 pulgadas y sección transversal de 4 pulgadas cuadradas. La corriente que pasa por la bobina es 2,5 ampere y la curva BH del material del núcleo es la misma que la que se muestra en la figura 5-32. Para determinar el total de flujo en el circuito magnético, primero se debe hallar la (H) como sigue:

$$H = \frac{NI}{L}$$

$$H = \frac{200 \times 2{,}5}{20}$$

H = 25 ampere-vueltas por pulgada.

Luego, sobre la curva B-H localícese la intersección de la curva y la línea vertical correspondiente a 25 ampere-vueltas por pulgada cuadrada, y léase el valor correspondiente de densidad de flujo (B), el cual es, en este caso, 85.000 líneas por pulgada cuadrada. Finalmente, sustitúyanse los valores conocidos de densidad de flujo y superficie en la ecuación del flujo, y obténgase el valor de Φ.

$$\Phi = BA$$

sustituyendo:

$$\Phi = 85.000 \times 4$$

$$\Phi = 340.000 \text{ líneas}$$

En consecuencia, es evidente la facilidad con que se puede determinar el flujo total de un circuito magnético cuando se dispone de una curva B-H.

5-11 RESUMEN DE ELECTROMAGNETISMO Y CIRCUITOS MAGNÉTICOS

Antes de entrar a considerar la inducción electromagnética, conviene resumir lo estudiado sobre electromagnetismo, electroimanes y circuitos magnéticos.

El electromagnetismo es el efecto magnético producido por el paso de una corriente eléctrica por un pedazo de alambre recto o bobinado. Toda vez que una corriente fluye por un conductor, se forma un campo magnético alrededor del mismo. Este campo magnético siempre aparece en ángulo recto respecto del sentido de la corriente que lo produce. La fuerza del campo magnético varía en forma directamente proporcional con la corriente del conductor, e inversamente proporcional con la distancia al mismo. El sentido del campo magnético alrededor de un conductor de corriente puede determinarse por la regla de la mano izquierda.

Las corrientes paralelas que fluyen en la misma dirección producen campos magnéticos de atracción; mientras que corrientes paralelas que fluyen en direcciones opuestas producen campos magnéticos de repulsión. Las corrientes de conductores colocados en ángulo recto entre sí producen campos magnéticos que tienden a forzar a los conductores a alinearse en forma paralela, con sus corrientes fluyendo en la misma dirección.

Cuando se convierte un conductor de electricidad en una espira, todas las líneas entran por un lado de la misma y salen por el otro. Las líneas de fuerza de un solenoide (o bobina) producen un campo magnético que es similar al campo de una barra imán. Si las vueltas o espiras del solenoide están muy cerca una de otra, el campo magnético resultante es más potente que si estuvieran separadas.

Una bobina devanada sobre un núcleo de material magnético, constituye un electroimán. La fuerza del campo magnético de un electroimán depende de la intensidad de la corriente que pasa a través de la bobina, el número de vueltas, el diámetro de las mismas, la longitud del campo magnético y el material usado para el mismo.

El camino seguido por las líneas de fuerza magnéticas a través del aire o de un material magnético se llama "circuito magnético". Las leyes aplicables a éste son las mismas que las aplicables a un circuito eléctrico. Corriente, tensión y resistencia de un circuito eléctrico, son comparables a las líneas de flujo magnético, fuerza magnetomotriz y reluctancia, respectivamente, de los circuitos magnéticos.

Una curva de magnetización relaciona el efecto de un determinado cambio de la intensidad de campo sobre la densidad de flujo de un material magnético. Tal curva se llama también B-H. Dos puntos importantes de dicha curva son el codo y el punto de saturación. Durante el estado de saturación, un incremento de la intensidad de campo no tendrá efecto aparente sobre la densidad de flujo. Cada material magnético sigue un proceso de magnetización distinto, pues la densidad de flujo en un material magnético no varía en proporción directa a la intensidad de campo.

5-12 INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

En lo tratado anteriormente se supuso que la fuente de tensión era una batería. Sin embargo, como fuente de producción de f.e.m. en gran escala, la batería es cara y poco práctica. Por esta razón, es necesario valerse de otros medios para

obtener energía eléctrica en grandes cantidades. La forma más común para obtenerla es mediante el uso del *generador*. El generador es un dispositivo que emplea el principio de inducción electromagnética para su funcionamiento.

La inducción electromagnética se define como la inducción de una f.e.m. en un conductor que atraviesa, o es atravesado, por un campo magnético. La tensión generada por la inducción electromagnética puede ser dividida en tres clases:

a) La tensión resultante del movimiento relativo entre un conductor y un campo magnético;

b) La tensión que aparece en un circuito debido a la variación del campo magnético que rodea un circuito próximo; se llama *inducción mutua;*

c) La tensión inducida en un conductor por variaciones de corriente en el propio conductor, conocida como *autoinducción* (self-inducción). La inducción mutua y la autoinducción se tratarán expresamente en el capítulo 9 de este libro. Por ahora, sólo consideramos la inducción electromagnética producida por el movimiento relativo entre un conductor y un campo magnético.

La generación de la electricidad en la forma utilizada en nuestros días empezó con el descubrimiento de la f.e.m. inducida, realizado por Miguel Faraday en 1831. Como agregado para una mejor comprensión de este tema, veremos ahora las relaciones entre campos eléctricos y magnéticos y la teoría electrónica de la inducción electromagnética.

Relaciones entre los campos eléctricos y magnéticos

El electromagnetismo ha sido atribuido al flujo de corriente en un conductor, y éste, al movimiento de las cargas. En consecuencia, el electromagnetismo será producido por el movimiento de las cargas. Recordando que una carga eléctrica tiene un campo eléctrico a su alrededor, se infiere que un campo eléctrico en movimiento crea un campo magnético. Este fenómeno se utiliza como base del desarrollo y la explicación del funcionamiento de los generadores, y de la producción de ondas de radio.

La fuerza de un campo magnético actúa en ángulo recto con respecto al campo eléctrico, y en la misma forma con respecto al sentido en el cual se desplaza la carga eléctrica asociada con el campo eléctrico. Este concepto se muestra en la figura 5-33. El campo eléctrico de una carga negativa, por ejemplo, de un electrón, se observa en la parte A de la figura, mientras que el campo magnético de un conductor figura en la parte B. Cuando las partes A y B están combinadas como en C, pueden observarse fácilmente las relaciones entre el campo eléctrico y magnético de una carga móvil. Nótese que cuando una línea de fuerza eléctrica cruza una línea de fuerza magnética, se cortan perpendicularmente, y que las líneas de fuerza eléctrica y magnética están en ángulo recto con respecto al sentido de desplazamiento de la carga.

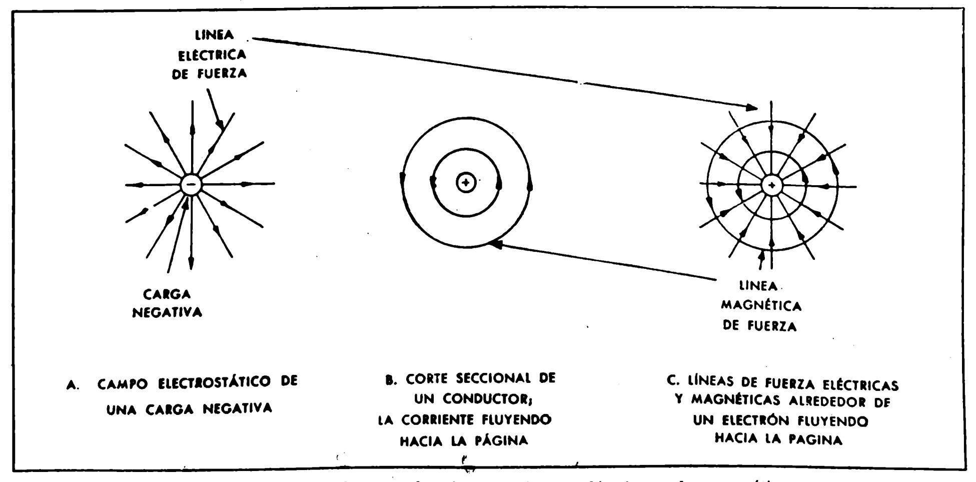


Figura 5-33. Relación entre las líneas de fuerza eléctricas y las magnéticas

Teoría electrónica de la inducción electromagnética

La causa de la inducción electromagnética puede deducirse de los principios eléctricos explicados anteriormente. Considérese el caso de un conductor móvil en un campo magnético fijo (estacionario) (figura 5-34 A). El conductor se muestra desplazándose hacia abajo, cortando las líneas de fuerza.

El conductor de la figura 5-34 B contiene electrones libres, uno de los cuales está indicado. Cuando el conductor se desplaza hacia abajo a través del campo magnético, los electrones libres del conductor deben, necesariamente, desplazarse junto con el mismo. El sentido del movimiento del electrón libre es hacia abajo (5-34 C). Anteriormente se estableció que una carga móvil produce un campo magnético en un plano que formará ángulo recto con el sentido del movimiento. Luego, hay un campo magnético producido por el desplazamiento del electrón libre, según se ve en 5-34 C. Téngase en cuenta que el campo magnético a la derecha del electrón libre en movimiento, *va en el mismo sentido* que el campo del imán, de polo norte a polo sur. De esta forma, se refuerza el campo magnético resultante del lado derecho del electrón libre en movimiento. No obstante, a la izquierda, el campo del electrón se opone al del imán, y el campo magnético se debilita. En estas condiciones, el electrón libre es empujado desde la porción del campo reforzado hacia la porción debilitada del campo, o de derecha a izquierda, según se observa en la parte D de la figura. Otros electrones libres se desplazan de la misma manera, causando así la acumulación de un exceso de electrones en el extremo izquierdo del conductor, que se cargan negativamente. El extremo derecho tiene un déficit de electrones y, por lo tanto, queda cargado positivamente, según se observa en la parte E.

En el conductor indicado en la figura 5-34 E, se consumió trabajo para desplazar los electrones de derecha a izquierda, existiendo, por lo tanto, una diferencia de potencial entre los extremos del conductor. En realidad, cada electrón se desplaza una distancia infinitesimal, produciendo una pequeña diferencia de potencial. Sin embargo, esto ocurre en toda la longitud del conductor y las diferencias de potencial se suman, dado que están en serie, lo que produce una gran diferencia de potencial entre los extremos del conductor. Esta diferencia de potencial se mantiene durante tanto tiempo como el conductor se siga desplazando hacia abajo. Como el extremo negativo está a un potencial inferior al positivo, se considera que el conductor actúa como una batería. Si se conecta un circuito

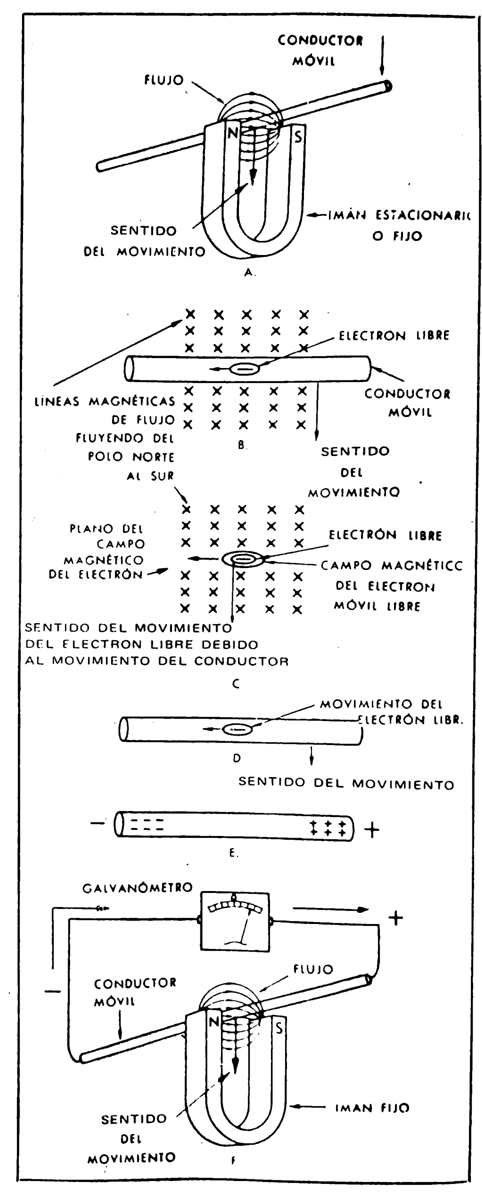


Figura 5-34. Teoría electrónica de la inducción electromagnética

externo a los extremos del conductor, por ejemplo un galvanómetro (5-34 F), fluirá una corriente debido a la tensión inducida.

Los párrafos precedentes establecieron la tensión inducida en un conductor, cuando éste se desplaza dentro de un campo magnético estacionario. La inversa es también cierta, y es: Si el conductor permanece inmóvil y el imán se desplaza de manera que su campo corte al conductor, se inducirá una tensión en el mismo. De aquí que, siempre que se produzca un movimiento relativo entre un conductor y un campo magnético tal que el primero corte al segundo, se induce en el conductor una diferencia de potencial.

Factores determinantes de la magnitud y polaridad de una tensión inducida

Hay cuatro factores que determinan la magnitud de la tensión inducida: número de vueltas del conductor, intensidad del campo magnético, velocidad del movimiento relativo del conductor con respecto al campo magnético y el ángulo bajo el cual corta el conductor al campo magnético.

En la figura 5-35 A puede verse que una sola vuelta de alambre con sus extremos conectados a un galvanómetro es atravesada por el campo magnético de una barra imantada. Cuando esta barra se mueve a través de la espira, la tensión inducida origina una corriente en el circuito según se ha indicado. Si se agregan más vueltas de alambre (parte B de la figura), para igual movimiento del imán, habrá una mayor deflexión de la aguja del galvanómetro. La razón de esto es que las espirales de alambre están, en realidad, conectadas en serie; y la tensión inducida resultante es la suma de las tensiones de cada espira.

El segundo método de incrementar la magnitud de la tensión inducida es aumentar la fuerza del campo magnético. Esto puede hacerse colocando un arrollamiento alrededor del imán (figura 5-36), es decir, aumentando la fuerza del campo mediante la acción electromagnética. El corte de este campo incrementado por un conductor producirá una tensión inducida mucho mayor.

El tercer factor que influye en la magnitud de la tensión inducida es la velocidad de movimiento relativo del conductor con respecto al campo magnético o viceversa. Si el conductor pasa a través del campo magnético, primero lentamente y después rápidamente, se verá que cuanto mayor es la velocidad del movimiento tanto mayor es la tensión originada. Luego, vemos que aumentando la velocidad relativa entre el conductor y el campo magnético, aumenta la tensión inducida. Si se detiene el movimiento no se producirá tensión inducida, ya que no se cortará ninguna línea de flujo.

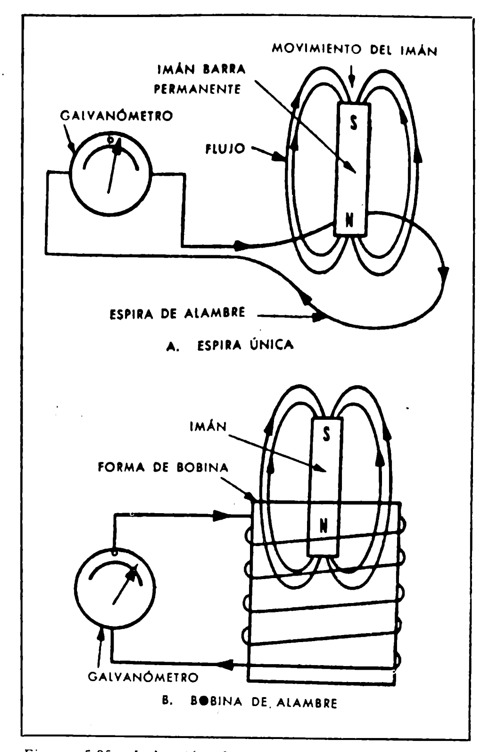


Figura 5-35. Inducción de una tensión en una espira única y en una bobina de alambre

Cuando un conductor se mueve de norte a sur a través de un campo magnético, o viceversa, paralelamente a las líneas de fuerza, no habrá tensión inducida, puesto que no se corta ninguna línea de fuerza. Si el mismo conductor corta el campo magnético exactamente en ángulo recto con respecto a las líneas de fuerza, todas las líneas resultan cortadas y se inducirá la máxima tensión en el conductor. Cualquier ángulo comprendido entre la dirección paralela al movimiento y la dirección perpendicular al mismo, crea un camino más largo, a través del cual debe seguir el conductor

hasta cortar a todas las líneas de fuerza. Esto, en realidad, disminuye la velocidad de corte, que a su vez se traduce en una disminución de la magnitud de la tensión inducida.

Si se estudia nuevamente la figura 5-36, y se invierte el movimiento del conductor (hacia arriba), los electrones libres que el mismo contiene reaccionan de manera opuesta a la presentada antes en la figura 5-34, puesto que la polaridad de la tensión se invierte, y el galvanómetro indica un flujo inverso de corriente inducida. Es también evidente que invirtiendo el sentido del campo magnético se producirá la misma reacción.

Ley de Lenz

De acuerdo con la ley de la conservación de la energía, la energía no puede crearse ni destruirse; por lo tanto, la tensión (energía eléctrica) producida por inducción electromagnética debe originarse a expensas de otras formas de energía. En este caso, la energía mecánica (movimiento del conductor o del imán) se transforma en energía eléctrica en la bobina. Experimentos sobre tensiones inducidas, realizados por el físico alemán Lenz, lo llevaron al descubrimiento de la ley que gobierna la polaridad de la tensión inducida. Esta ley, llamada *ley de Lenz,* dice:

La tensión debida a la inducción electromagnetica tiene un sentido tal, que el flujo de corriente y su campo magnético resultante se oponen a la causa que la produce.

La ley de Lenz se usa para determinar el sentido de la tensión y corriente inducidas en un circuito.

Mediante la figura 5-37 A se puede explicar la aplicación de la ley de Lenz. El campo magnético

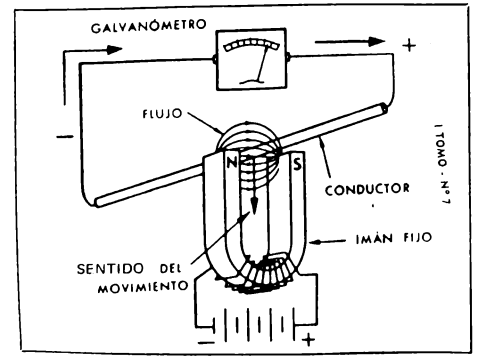


Figura 5-36. Método para aumentar la fuerza del campo de un imán

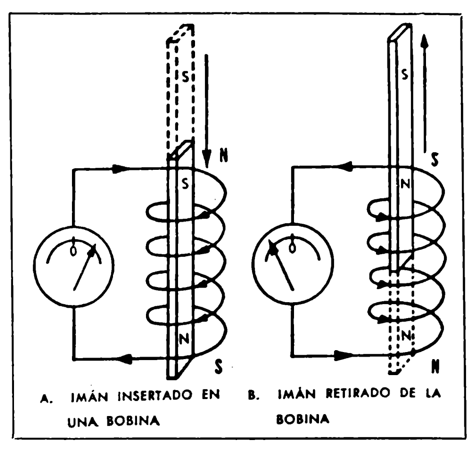


Figura 5-37. Aplicación de la ley de Lenz

producido por la bobina, debido a la acción de la corriente inducida, debe tener tal dirección que se oponga a la entrada del imán dentro de la bobina. El movimiento del imán dentro de la bobina es la fuerza productora de la corriente inducida. Usando la regla de la mano izquierda (para bobinas) en la determinación del sentido de la corriente en dicho campo magnético, el pulgar, que indica el sentido del polo norte, apunta hacia el polo norte del imán. Por lo tanto, la dirección de los dedos según se ve en la figura, da el sentido de la corriente. De acuerdo con la ley de Lenz, cuando se retira el imán de la bobina (según muestra la figura 5-37 B), la corriente inducida debe tener un sentido tal que el campo magnético producido por ésta trate de atraer nuevamente al imán hacia dentro de la bobina. Usando la regla de la mano izquierda, se puede apreciar que el sentido de la corriente se ha invertido.

5-13 MOTORES Y GENERADORES SIMPLES DE CORRIENTE CONTINUA

Un *generador* es una máquina que emplea los principios de la inducción electromagnética para transformar energía mecánica en eléctrica. Según se ha explicado, la inducción electromagnética induce tensión en una bobina, siempre que ésta sea cortada por las líneas de fuerza de un campo magnético. Un generador consiste en un número de bobinas y un campo magnético constante, dispuestos de tal manera que el movimiento relativo de uno con respecto al otro induce una tensión en las bobinas.

Acción de un generador

Se tiene una espira suspendida en un campo magnético (fig. 5-38). La magnitud de la tensión inducida en la espira está determinada por el régimen de revoluciones de la espira móvil dentro del campo magnético (líneas de fuerzas del mismo), y la intensidad de flujo que atraviesa la espira. Cuando la espira gira dentro del campo a un régimen de revoluciones constante, la tensión instantánea inducida en la misma depende de la densidad de flujo del campo magnético en cada punto de medición. En el instante en que el flujo concatenado es mayor, la tensión inducida es máxima. Esta condición se cumple cuando la bobina pasa por el punto de máxima densidad de flujo (fig. 5-38 A). Nótese que en ese instante los lados de la espira (a-b y c-d) se mueven perpendicularmente a las líneas de fuerza, cortando así el máximo número de éstas. En el momento en que el flujo concatenado es mínimo, o sea cuando la espira pasa por el punto en que la densidad de flujo es mínima, la tensión inducida también resulta mínima, como se observa en la figura 5-38 B. Obsérvese que en la parte B, los costados de la espira se mueven paralelamente a las líneas de fuerza en vez de atravesarlas; por lo tanto, no hay tensión inducida en la espira.

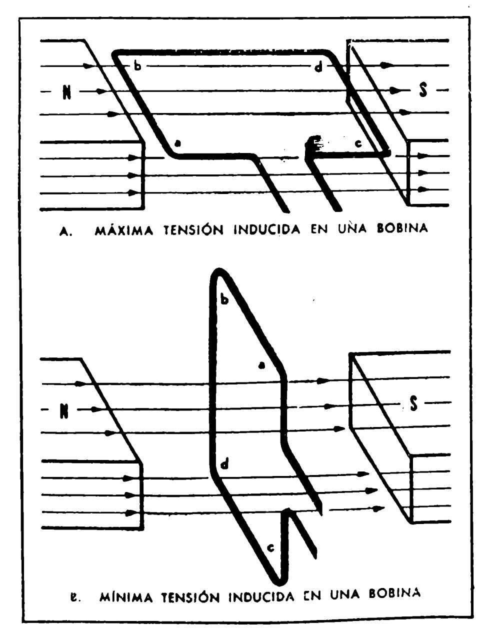


Figura 5-38. Espira única de alambre en un campo magnético

Puede considerarse que la tensión que se induce en la bobina mientras está girando en el campo magnético, se debe a la acción del conductor que corta las líneas de fuerza. Esta es solamente una forma más de expresar que la tensión inducida en una bobina se debe al movimiento de la espira con respecto al flujo concatenado en ella. Las únicas partes de la espira que cortan el campo magnético cuando ésta gira, son los lados a-b y c-d (fig. 5-38). La conexión entre ambos (lados b-d), no tiene ninguna tensión inducida.

Regla de la mano izquierda para generadores

La figura 5-39 muestra una sección transversal del generador simple de la figura 5-38. Se supone que la espira gira en el sentido de las agujas del reloj. Como resultado de este movimiento, el lado A de la espira se desplaza hacia arriba, mientras que el B lo hace hacia abajo. En la parte B de la figura, la flecha gruesa indica la dirección de las líneas de fuerza. La tensión que se induce en la espira, según la ley de Lenz, debe tener un sentido tal, que el campo magnético producido por un flujo de corriente en la bobina, se oponga a la acción de la tensión inductora. Esto significa que el campo magnético producido por la corriente inducida que pasa a través de la espira, debe tener el sentido indicado por la flecha punteada de la figura 5-39 B.

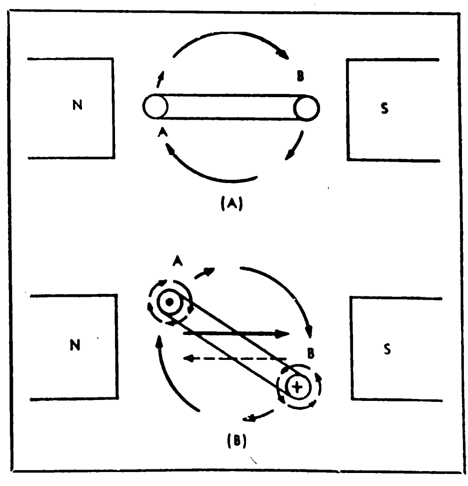


Figura 5-39. Vista de un corte seccional de una bobina dentro de un campo magnético



Figura 5-40. Regla de la mano izquierda para generadores

Tal campo magnético debe estar compuesto por un campo de sentido de las agujas del reloj alrededor del conductor A, y un campo de sentido contrario a éste alrededor del conductor B. Al aplicar la regla de la mano izquierda para conductores de corriente, la corriente en el conductor A circula hacia el lector, y en el conductor B, hacia atrás de la página. Por lo tanto, se puede observar que los lados opuestos de la espira presentan tensiones de polaridad opuestas.

Cuando se considera la tensión inducida en ambos lados de la espira como debidos a una acción de corte, el sentido de la corriente inducida en el alambre puede determinarse por *la regla de la mano izquierda para generadores.* Esta regla, indicada en la figura 5-40, se enuncia como sigue:

"Con el pulgar, índice y mayor de la mano izquierda colocados perpendicularmente, apuntando el índice en el sentido del campo magnético y el pulgar en el sentido del movimiento del conductor, el mayor apuntará entonces en el sentido de la corriente inducida". Para aplicar esta regla es siempre necesario suponer que el campo magnético es estacionario, y que es el conductor el que está en movimiento a través del campo.

Generadores simples de corriente continua

La figura 5-41 muestra el funcionamiento de un sencillo generador de C.C., que consiste en una sola espira suspendida en un campo magnético. Sus extremos están conectados a un aparato llamado *conmutador*, que convierte la corriente alternada generada por la espira giratoria (debido a la inversión de las posiciones de los lados X e Y, según la bobina va girando) en una corriente que fluye en un solo sentido a través del circuito exterior (bornes exteriores). En general, un conmutador consiste en un anillo metálico (generalmente de cobre) dividido en un cierto número de segmentos, aislados unos de otros, y del eje sobre el cual van montador junto con la bobina. En el generador elemental mostrado en la figura, el conmutador consiste en sólo dos segmentos, separados por aire, cada uno conectado a un lado de la espira giratoria. Dos escobillas (de carbón o metal), montadas en lados opuestos del conmutador, se apoyan en su superficie para lograr contacto eléctrico entre la bobina y el circuito externo.

El funcionamiento del conmutador se comprende fácilmente estudiando la figura 5-41, que muestra las posiciones del conmutador durante una vuelta completa de la bobina. Para las posiciones de rotación de *a* a *e*, la corriente en la bobina rotativa fluye en el sentido indicado por las flechas, y sufre los cambios de magnitud indicados por los puntos correspondientes en la curva de tensión. Puede verificarse el sentido por el uso de la regla de la mano izquierda para generadores. En la posición *e* la bobina ha completado una media revolución y su tensión inducida es cero. Durante la segunda media revolución, entre las posiciones *f* a *i*, cada lado de la bobina corta el campo en sentidos opuestos y, en consecuencia el flujo de la corriente se invierte. Pero, en el momento en que la corriente en los lados de la bobina cambia su sentido, los segmentos del conmutador invierten sus contactos con las escobillas; y, en consecuencia, la corriente que fluye por la carga está en el mismo sentido durante la segunda mitad de la revolución, que la que tenía durante la primera mitad, como se muestra en los puntos *e* a *i* sobre la curva. Por lo tanto, aunque en un generador de corriente continua, el flujo de la corriente cambie de sentido en la bobina giratoria, en la descarga externa dicho flujo tiene sólo un sentido por el efecto del conmutador.

Motores de corriente continua

Un *motor* es una máquina que utiliza los principios de la inducción electromagnética para convertir energía eléctrica en energía mecánica.

Es sabido que existe un campo magnético en derredor de cualquier conductor de corriente, y que la intensidad de este campo depende de la cantidad de corriente que circula por el conduc-

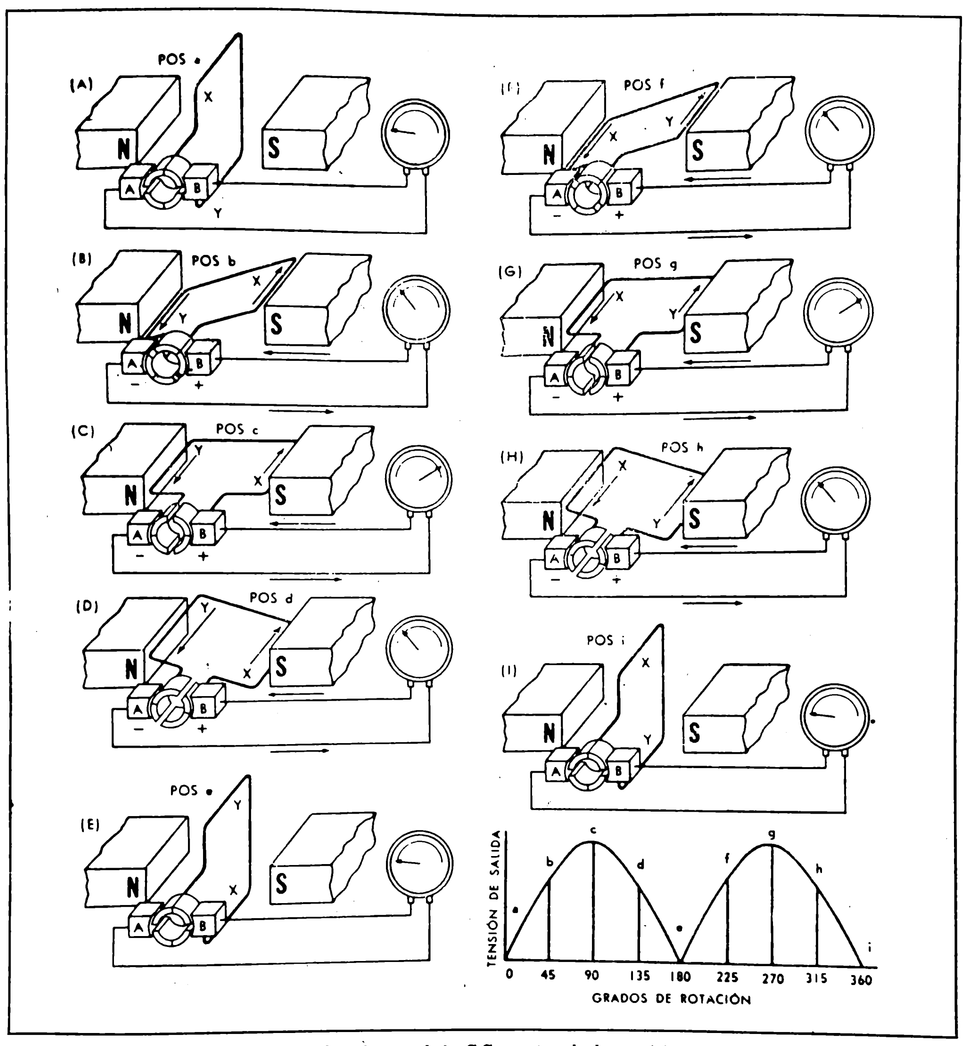


Figura 5-41. Generador elemental de C.C. mostrando las posiciones de la bobina en una revolución con la forma de onda de la tensión de salida

tor. Cuando se coloca un conductor de corriente en un campo magnético, se ejerce sobre el conductor una acción tendiente a desplazarlo del campo. Esta fuerza, ilustrada en la figura 5-42, es el principio fundamental de los motores. Nótese que el conductor tiende a moverse en ángulo recto al campo.

La figura 5-43 muestra una sección transversal de un motor simple de corriente continua. Si se suspende una bobina en un campo magnético co-

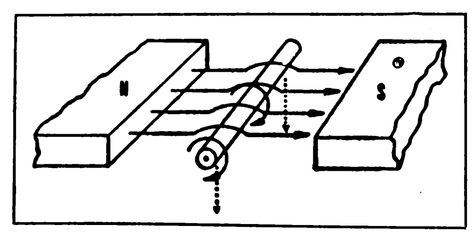


Figura 5-42. Conductor de corriente en un campo magnético

mo se muestra en la parte A de la figura, no se produce par de rotación que ejerza efecto sobre la bobina. En esta posición, la bobina está en un plano neutral, y las fuerzas que actúan sobre los lados de la misma sólo tratan de separarlos. Si se gira la bobina a la posición mostrada en la parte B, las fuerzas que actúan sobre los lados de la misma producen un efecto rotativo. Este efecto

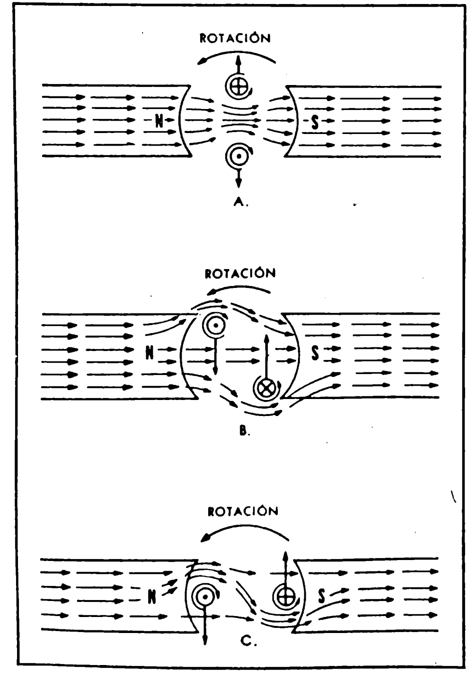


Figura 5-43. Motor de corriente continua mostrando varias posiciones de la bobina conductora de corriente

rotativo alcanza su máximo en la parte C de la figura. Si se invirtiera la corriente de la bobina en el momento preciso, se crearía una rotación constante. La inversión de corriente se consigue mediante el uso de un conmutador. Sin embargo, si la bobina está en posición de par nulo, no arrancará cuando se le suministre la corriente. Si se agrega otra bobina en ángulo de 90° con la original, el conjunto así formado girará, sea cual fuere su posición inicial.

En la figura 5-44, actúa sobre la bobina C-D una fuerza que lleva el sentido de las agujas del reloj, y según ésta va girando, acciona el conmutador y también hace girar la bobina A-B. A medida que C-D se mueve hacia el plano neutro, el conmutador conduce corriente a la bobina A-B. La A-B es entonces obligada a girar hasta que la corriente sea conducida nuevamente por el conmutador, a la bobina C-D, esta vez en sentido inverso. La repetición de este proceso (ciclo) causa una continua acción en el sentido de giro de las agujas del reloj.

Regla de la mano derecha para motores

Hemos aplicado la regla de la mano izquierda a los generadores y, como un motor es la inversa de un generador, la regla para motores se denomina "regla de la mano derecha". Esta regla se ilustra en figura 5-45, y se enuncia: "Con el pulgar, índice y mayor de la mano derecha colocados perpendicularmente, apuntando el índice en la dirección del campo magnético y el mayor en la dirección de la corriente circulante por el conductor, el pulgar apuntará entonces en el sentido del movimiento del conductor".

Cuando se comparan los diagramas de motores sencillos de las figuras 5-43 y 5-44, se puede ver que cambiando la polaridad de la tensión aplicada a la bobina, cambiará el sentido de rotación del motor.

5-14 RESUMEN

La propiedad de un material de atraer trozos de hierro o acero, se llama magnetismo. Los imanes hallados en la naturaleza se llaman imanes naturales, mientras que los producidos con materiales magnéticos normalmente no magnetizados se llaman imanes artificiales. Estos últimos se dividen en dos clases: temporarios y permanentes, dependiendo esta denominación de su capacidad de retención de los efectos magnéticos. Las regiones de un imán donde son mayores los efectos magnéticos se llaman *polos* del mismo. La teoría molecular del magnetismo se basa en la presunción de que todas las moléculas de un material magnético actúan como diminutos imanes.

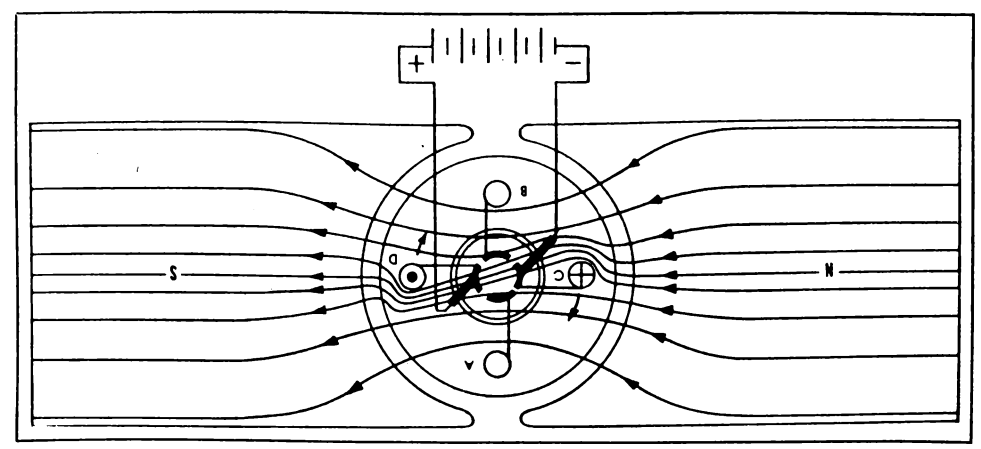


Figura 5-44. Motor elemental de C.C. con dos bobinas

Los efectos que los imanes ejercen mutuamente entre sí, son una medida de su fuerza. La ley de Coulomb para la fuerza de atracción o repulsión entre dos polos magnéticos establece: "La fuerza ejercida entre dos polos magnéticos es directamente proporcional al producto de las dos masas polares, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa". Un campo magnético (región donde actúan las fuerzas magnéticas), se caracteriza por fuerzas que varían en intensidad y dirección de un punto al otro del campo. Aunque las líneas de fuerza magnéticas son invisibles, tienen las siguientes propiedades: son continuas y forman espiras cerradas; tienen un estado de tensión a lo largo de la dirección que llevan; nunca se cruzan una con otra; son conducidas por todos los materiales y las líneas de fuerza de igual sentido tienden a apartarse una de otra.

El magnetismo y los efectos magnéticos producidos por el paso de una corriente eléctrica a través de un conductor, o al mover el conductor dentro del campo de un imán, se llama electromagnetismo. El campo magnético que existe en derredor de un conductor de corriente siempre se sitúa en ángulos rectos con la corriente que lo produce. La fuerza de tal campo magnético varía en forma directa con la corriente que pasa por el conductor, e inversamente con la distancia del mismo.

El sentido del campo magnético alrededor de un conductor de corriente puede determinarse con la regla de la mano izquierda para conductores.

Las corrientes paralelas que fluyen en el mismo sentido producen campos magnéticos de atracción, mientras que las corrientes paralelas que fluyen en sentidos opuestos producen campos magnéticos de repulsión. Las corrientes que pasan por conductores situados en ángulos rectos entre sí, producen campos magnéticos que tienden a forzar los conductores a una alineación paralela, con sus corrientes fluyendo en el mismo



Figura 5-45. Regla de la mano derecha para motores

sentido. Las líneas de fuerza de un solenoide producen un campo magnético similar al de las barras imantadas. El sentido del campo magnético de una bobina puede determinarse por la regla de la mano izquierda para solenoides.

Una bobina arrollada sobre núcleo magnético se denomina *electroimán*. La fuerza del campo magnético de un electroimán depende del número de vueltas del arrollamiento, intensidad de la corriente, diámetro de las espiras, longitud del camino magnético, y del material que forma dicho camino. El camino que las líneas de fuerza toman a través del aire o de un material magnético, se llama circuito magnético. Las líneas de flujo, fuerza magnetomotriz (fmm) y reluctancia de un circuito magnético son comparables a la tensión, corriente y resistencia, respectivamente, de los circuitos eléctricos. La curva de magnetización muestra el efecto de cualquier cambio producido en la fuerza o intensidad de campo respecto a la densidad de flujo de un material magnético. Cada material magnético sigue una curva de magnetización distinta, dado que la densidad de flujo de cualquier material *no* varía en proporción directa a la fuerza o intensidad de campo magnético.

La inducción electromagnética se define como el proceso por el cual una fuerza electromotriz se induce en un conductor que corta (o es cortado) por un campo magnético. Siempre que existe un movimiento relativo entre un conductor y un campo magnético, se induce una tensión en el conductor. La magnitud de la tensión inducida en una bobina es directamente proporcional al número de vueltas, la intensidad del campo magnético, la velocidad relativa de la espira con respecto al campo magnético, y el ángulo bajo el cual el conductor corta al campo magnético. El sentido de la tensión inducida puede determinarse por la ley de Lenz, que establece: "La tensión debida a la inducción electromagnética debe tener una polaridad tal, que el campo magnético resultante de la corriente inducida, se opone a la acción productora de corriente".

Los generadores y motores emplean los principios de la inducción electromagnética en la conversión de energía mecánica en eléctrica y de eléctrica en mecánica, respectivamente. Los sentidos de corriente, flujo magnético y rotación, pueden determinarse aplicando la regla de la mano izquierda para generadores, y la de la mano derecha para motores.

CUESTIONARIO

1. Un material magnético que posee las propiedades de un imán, cuando se encuentre en estado natural, se llama imán ....
2. Un imán producido con un material magnético normalmente no magnetizado, se llama imán ....
3. ¿Cuál es la diferencia entre un imán temporario y uno permanente?
4. Las regiones de un imán donde los efectos magnéticos son mayores, son los .... del imán.
5. Enuncie la ley fundamental para atracción y repulsión entre imanes.
6. Explique qué se entiende por "teoría molecular del magnetismo".
7. ¿Qué dos factores rigen la fuerza de atracción o repulsión entre dos polos magnéticos?
8. Enuncie las propiedades de las líneas de fuerza magnética.
9. Un polo norte magnético de una masa magnética de 100 unidades y un polo sur de 200 unidades, están separados por una distancia de 5 cm en el aire. Halle la fuerza en dinas que actúa sobre los polos.
10. Defina: flujo magnético, densidad de flujo, reluctancia, permeabilidad, magnetismo remanente y retentividad;
11. Determinar la densidad de flujo de un campo magnético uniforme en líneas de fuerza por pulgadas cuadradas, cuando el polo magnético tiene un flujo de 144.000 líneas de fuerza, en un área de 20 pulgadas cuadradas.
12. Calcule la permeabilidad de un material magnético en el cual la densidad de flujo de 76 kilolíneas por pulgada cuadrada es producida por una fuerza magnética de 18 ampere vueltas por pulgada.
13. Defina electromagnetismo y electroimán.

14. Enuncie la regla de la mano izquierda para conductores.

15. Las corrientes paralelas que fluyen en el mismo sentido producen .... mientras que las que fluyen en distinto sentido producen ....

16. Enuncie la regla de la mano izquierda para solenoides.

17. ¿Cuáles son los equivalentes magnéticos de las siguientes propiedades de un circuito eléctrico: corriente, tensión y resistencia (respectivamente)?

18. Calcular la fuerza magnetomotriz en gilbert que producirá un electroimán que tiene un arrollamiento de 150 vueltas, por el que fluye una corriente de 0,6 ampere.

19. Calcular la fmm en gilbert requerida para producir una intensidad de campo de 2.000 oersted en un circuito magnético de 25 cm de largo.

20. ¿Qué muestra una curva de magnetización?

21. ¿Qué se entiende por inducción electromagnética?

22. Enuncie la ley de Lenz.

23. Una máquina que emplea los principios de la inducción electromagnética para convertir la energía mecánica en eléctrica, se llama... .... mientras que una máquina que emplea los mismos principios para transformar energía eléctrica en mecánica se llama ....

24. Enuncie la regla de la mano izquierda para generadores.

25. Enuncie la regla de la mano derecha para motores.

CAPITULO VI

Instrumentos de Medida

6-1 Introducción

En el capítulo 3 se ha estudiado el manejo de los principales aparatos de medición y su aplicación para la medición de corriente, tensión y resistencia en los circuitos electrónicos. Este capítulo tratará sobre el material visto anteriormente, y explicará las formas reales de construcción y las características del mecanismo móvil del medidor y circuito interno asociado.

Veremos en primer término los tipos de mecanismos del medidor y sus aplicaciones primarias. Se describirá el tipo de movimiento de medición más común que es el D'Arsonval o bobina móvil, y se verá su aplicación para la medición de corriente alternada y continua. Se estudiarán también otros tipos de mecanismo de movimientos de los medidores, tal como el dinamómetro, que sirve para medir valores de corriente alternada relativamente altos, y también el tipo de mecanismo de hierro móvil.

Como se puntualizó anteriormente, el mecanismo puede considerarse el *corazón* de cualquier tipo de instrumento de medición que use una escala como dispositivo indicador.

También tiene importancia el circuito del medidor, que permite utilizar el instrumento en sus diversas capacidades de medición. Este capítulo explica el porqué de la utilización y el cálculo de los valores de las distintas partes de los instrumentos que se emplean para medir corriente, tensión y resistencia en un circuito eléctrico.

6-2 MECANISMO MEDIDOR

Los mecanismos medidores hacen uso del flujo magnético producido por la corriente que circula en un conductor. Los instrumentos accionados magnéticamente están comprendidos dentro de dos grupos: el de D'Arsonval y el de placas de hierro móviles. El dinamómetro de tipo mecanismo de hierro utiliza la acción magnética, pero está estrechamente relacionado con el principio de funcionamiento de un motor.

Mecanismo medidor tipo D'Arsonval

El mecanismo medidor llamado *"mecanismo Weston"* se usa casi universalmente. Es una modificación del D'Arsonval o mecanismo de bobina móvil, y se basa en el principio de que una corriente que circula a través de una bobina móvil suspendida en un campo magnético fijo, creará un campo opositor, produciendo así un giro de la bobina. En la figura 6-1 A se ve la construcción básica de este mecanismo. El imán herradura produce el campo magnético fijo del mecanismo. Las piezas polares de hierro dulce (de precisión) están aseguradas en el interior de los extremos abiertos del imán. Para reservar espacio debajo de la escala correspondiente al instrumento, el imán está comprimido en forma circular, según indica la figura. Esto hace posible el uso de una escala dividida en un número de partes relativamente grande. La bobina móvil consiste, en sí misma, en un cuadro rectangular de aluminio, en el cual está devanada la bobina. Este cuadro está centrado alrededor de un cilindro de hierro dulce, que sirve para completar el circuito magnético. Nótese que la bobina móvil y el cilindro están casi completamente circundados por los extremos curvados de las piezas polares. El efecto de esta disposición es lograr que el campo magnético dentro del entrehierro de aire, sea uniforme y en ángulo recto con la bobina, sin tener en cuenta su posición angular. Un campo de este tipo, comúnmente llamado *radial*, permite emplear una escala lineal. La parte B de la figura muestra las líneas del campo magnético entre las piezas polares. El armazón completo de la bobina móvil, marco de hierro y cilindro de hierro dulce, están suspendidos sobre pivotes de rubí dentro del campo magnético de las piezas polares. La figura 6-1 C muestra una vista parcial, en corte, de un mecanismo medidor tipo D'Arsonval, armado.

El funcionamiento de este mecanismo medidor puede explicarse observando las partes A, B y C de la figura, e imaginando la acción de los com-

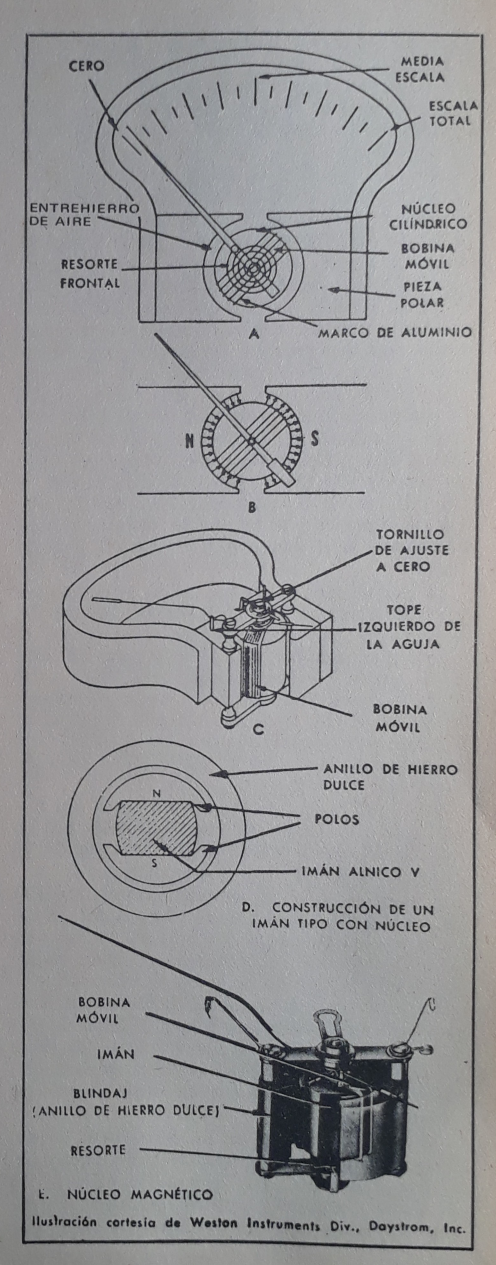


Ilustración cortesía de Weston Instruments Div., Daystrom, Inc.

Figura 6-1. Bobina móvil del instrumento-mecanismo

ponentes, como ya se ha explicado. Las espiras de la bobina móvil, según se ha dicho, están colocadas dentro del potente campo magnético del imán permanente. Los resortes espirales sirven para conducir corriente a y desde la bobina móvil; también los resortes hacen oposición a cualquier movimiento de la bobina de su posición de descanso. Cuando no hay corriente en la bobina, un indicador acoplado a la misma indica cero en una escala calibrada. Cuando fluye la corriente por la bobina, el campo magnético circundante a la misma actúa con el campo magnético del imán para producir un par de rotación o cupla, que hace girar la bobina. A este movimiento giratorio se opone la acción de los resortes espirales. La fuerza giratoria depende directamente de la cantidad de corriente que fluye por la bobina. Cuando esta fuerza giratoria iguale a la fuerza opuesta por la tensión de los resortes espirales, el indicador se detendrá, manteniendo esta posición durante el tiempo que fluye corriente por la bobina móvil. Si deja de fluir la corriente por la bobina móvil, el campo del mismo desaparecerá y la tensión de los resortes espirales volverá el indicador a su posición estática inicial.

La uniformidad del campo radial, producida por las piezas polares y el núcleo móvil, aseguran el movimiento de bobina siempre proporcional al torque producido por el flujo de la corriente. Este hecho puede verificarse observando en la parte B de la figura que, cualquiera sea la posición de la bobina móvil, las líneas magnéticas de fuerza del imán permanente están situadas en ángulo recto al campo producido por la corriente que pasa por la bobina.

Esto ocasiona un desplazamiento lineal del movimiento del medidor que, actuando sobre una escala lineal, puede utilizarse para la medición de la corriente o tensión.

A veces es necesario ajustar la posición estática del movimiento del medidor. Esta posición estática es la posición cero de la aguja del instrumento y puede lograrse mecánicamente, girando cuidadosamente el tornillo de ajuste a cero (parte C, figura 6-1), variando la posición de los extremos movibles de los resortes espirales y haciendo que la bobina móvil se mueva a una nueva posición cero. Se debe tener cuidado al efectuar el ajuste, debido a la delicada construcción de los resortes espirales.

En los últimos años se ha descubierto un número de aleaciones que presentan propiedades magnéticas superiores. Un ejemplo notable es el Alnico V, que produce un campo magnético excepcionalmente intenso; este material ha hecho posible muchos nuevos diseños de mecanismos móviles de los instrumentos. Estos nuevos diseños tienen el mismo principio de funcionamiento que el movimiento básico de D'Arsonval, o sus modificaciones.

Dos nuevos diseños, ilustrados en las partes D y E de la figura 6-1, utilizan los nuevos materiales magnéticos, colocando el imán dentro de la bobina móvil. Las principales ventajas obtenidas son: un campo de flujo más uniforme que proporciona una mejor linealidad de la escala y mayor precisión; y los efectos de blindaje de la armadura externa que hacen al medidor mucho más resistente a los efectos de campos magnéticos externos y golpes. Este diseño básico ya fue estudiado y reconocido como deseable desde el comienzo del medidor D'Arsonval, pero los materiales magnéticos que se necesitaban no eran obtenibles entonces.

Mecanismo medidor a hierro móvil

El tipo de medidor a hierro móvil consiste en una bobina, placas fijas y movibles de material magnético y una aguja indicadora. Cuando una corriente pasa por la bobina, se forma un campo magnético que magnetiza las placas fijas y las movibles que en posición de descanso son adyacentes. Este campo hace a las partes superiores de las placas polos sur y a las partes inferiores polos norte. Como sabemos, los polos de un mismo signo se repelen entre sí, con una fuerza que es proporcional a la corriente que fluye a través de la bobina. Los dos tipos más comunes de movimientos a hierro móvil se muestran en la figura 6-2.

En la figura 6-3 se ven las características que distinguen el funcionamiento del mecanismo a hierro móvil. Cuando dos barras de hierro dulce se colocan dentro de una bobina de alambre y se hace pasar una corriente por la misma, las barras se repelen mutuamente. Esto es debido a que por efecto electromagnético, se inducen polos del mismo signo en los extremos adyacentes de las barras. La polaridad magnética de los polos inducidos en las barras depende del sentido en que fluye la corriente. Nótese que aunque se invierta el sentido de la corriente dentro de la bobina, las barras quedan igualmente opuestas puesto que los polos magnéticos adyacentes son los mismos. Este carácter distintivo, aplicado al movimiento de las placas, permite al instrumento con este tipo de mecanismo, indicar un valor de corriente que puede ser fijo (corriente continua) o con dirección variable (corriente alternada).

La figura 6-4 muestra la escala que se utiliza con un instrumento de tipo hierro móvil. El nombre correcto para este tipo de escala, es el de *escala*

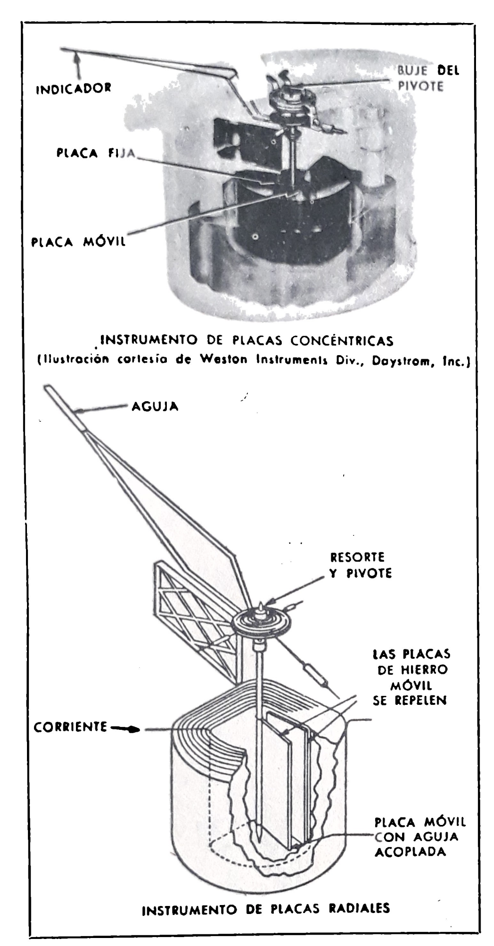


Figura 6-2. Mecanismo de instrumento de hierro móvil

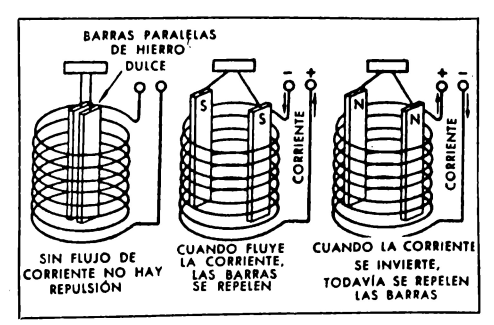


Figura 6-3. Principio de movimiento del instrumento de placas móviles

cuadrática. El instrumento del tipo de hierro móvil produce una desviación de la aguja proporcional al cuadrado del flujo de corriente, más bien que en relación directa a la intensidad de corriente, como es el caso de la escala lineal de D'Arsonval. Por ejemplo, si la corriente a través de la bobina se duplica, el campo magnético alrededor de cada placa será dos veces más fuerte. La repulsión combinada de las dos placas será cuatro veces mayor, resultando una desviación de la aguja que es cuatro veces mayor. Si se observa la figura 6-4, tenemos que la división número 5 está colocada aproximadamente en la posición a ¼ de la escala, mientras que la división número 10 resulta al tope de la escala. Las desviaciones de la aguja para este tipo de mecanismos seguirán, por lo tanto, la ley cuadrática, pues si la corriente aumenta, la desviación causada a la aguja será igual al cuadrado del incremento de corriente.

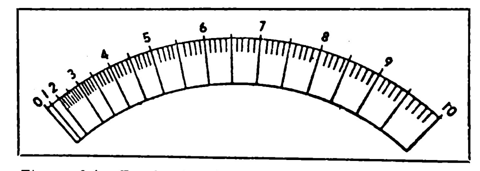


Figura 6-4. Escala tipo ley cuadrática, de instrumentos de hierro móvil

Mecanismo móvil del dinamómetro

El mecanismo del dinamómetro es útil para mediciones en corriente alternada. Funciona de acuerdo con el principio electrodinámico según el cual, por la interacción del campo magnético de una bobina móvil y el campo magnético de una bobina fija, se crea una fuerza mecánica resultante, que se usa para indicar la intensidad de corriente en la bobina móvil. En la figura 6-5 se puede ver la construcción de este mecanismo. La bobina fija consta de dos secciones iguales. Entre estas secciones está montado un eje con pivotes que sostiene la bobina móvil y la aguja. Como en el mecanismo de D'Arsonval, la bobina móvil adquiere energía por el flujo de corriente a través de ella. Los resortes controlan el movimiento del eje y la aguja, según se ha explicado, y están ajustados de manera similar. Las bobinas fija y móvil están conectadas en serie.

Para evitar que la bobina móvil conduzca toda la corriente normalmente medida con este movimiento, se coloca a través de ella un shunt físico inductivo en paralelo. Los ejes físicos de las dos secciones de la bobina fija y de la móvil, se ajustan de tal manera que no están paralelos. Cuando la corriente a medirse pasa por las bobinas, éstas tratan de alinearse en paralelo debido a la fuerza de sus campos magnéticos. Este es el movimiento tratado en el capítulo anterior, donde la corriente que fluye en dos conductores puestos en ángulo recto, producirá un campo magnético que tiende a alinear los conductores en posición paralela. La fuerza mecánica giratoria producida, hace girar la bobina móvil contra los resortes espirales y mueve la aguja indicadora sobre la escala. La fuerza giratoria creada es proporcional al producto de la fuerza del campo magnético de cada bobina. Estos campos son proporcionales a la cantidad de corriente que fluye en las bobinas. En consecuencia, la rotación resultante del eje es proporcional al *cuadrado* de la corriente aplicada, y se hace uso de la ley de escala cuadrática. como consecuencia de la tensión relativamente alta requerida para crear los campos magnéticos, existen muy pocas posibilidades de que este movimiento responda a corrientes muy reducidas. La aplicación más común del movimiento a dinamómetro es en circuitos de corriente alternada de valores elevados. Así como ocurre en el tipo a hierro móvil, este movimiento funciona sin tener en cuenta el sentido en que fluye la corriente.

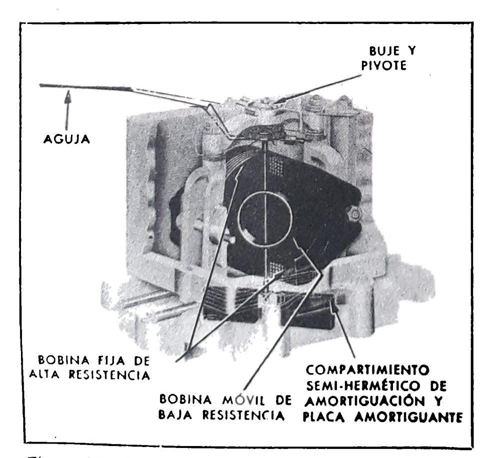


Figura 6-5. Instrumento de dinamómetro mostrando las bobinas fijas de alta resistencia y la bobina móvil de baja resistencia

Movimiento de un instrumento electrostático

El movimiento electrostático difiere grandemente en sus principios de funcionamiento de todos los otros tipos de medidores. Es el único que es accionado por una carga eléctrica estacionaria en lugar de una corriente. Se estudió en electricidad estática que existe una fuerza electrostática entre dos cuerpos cargados. Si los cuerpos, en este caso láminas paralelas, tienen cargas opuestas, la fuerza entre las mismas es de atracción. Este es el principio sobre el cual trabaja el movimiento electrostático.

El movimiento que se muestra en la figura 6-6, se construye con dos láminas montadas paralelamente, una en un eje en pivote y la otra fija. La principal ventaja de este tipo de movimiento está en la posibilidad de medir tensiones muy altas como se encuentran en la prueba de los tubos de rayos catódicos, donde existe muy pequeña intensidad.

El movimiento electrostático del medidor, debido a su resistencia interna muy alta, no ofrece un camino para el flujo de la corriente del circuito bajo prueba.

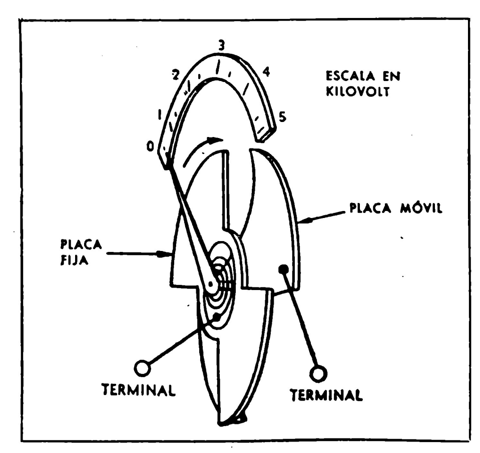


Figura 6-6. Principio del voltímetro electrostático con escala no lineal

Amortiguación de los movimientos del medidor

Una dificultad que aparece en la mayoría de los movimientos del medidor es la oscilación de la aguja indicadora. La aguja del medidor tiende a sobrepasar la cantidad verdadera y entonces oscila alrededor de esta cantidad, estacionándose después de un rato.

Esta oscilación es causada por la tensión en el resorte espiral que se opone al movimiento del medidor. El armazón del mecanismo tiene una pequeña masa en reposo. Cuando se pone en movimiento por acción del campo magnético, ganará inercia a medida que recorre la escala. La inercia hace que el mecanismo pase de largo el punto en el cual la tensión del resorte iguale a la fuerza magnética, y que la aguja se desplace hasta un punto donde la fuerza magnética es mayor. El movimiento se repite hasta que finalmente las dos fuerzas se equilibran. La oscilación de la aguja puede reducirse mucho por varios métodos de amortiguación. Se obtiene un método de amortiguar el movimiento de la bobina móvil mediante una aplicación de la ley de Lenz. Al estudiar la inducción electromagnética, se explicó que cuando un conductor se mueve dentro de un campo magnético, el campo magnético producido por la corriente resultante tiende a oponerse al movimiento del conductor. En la figura 6-1 se ha visto que la bobina del mecanismo está devanada sobre un armazón de aluminio que encierra el núcleo cilíndrico entre las piezas polares. Este armazón de aluminio forma una sola vuelta completa dentro del campo magnético del medidor. Cualquier movimiento de la bobina, y por lo tanto del armazón dentro de este campo magnético, inducirá una corriente en el armazón. Esta corriente produce un campo magnético que actúa conjuntamente con el potente campo magnético del imán permanente, y ofrece una ligera oposición al movimiento de la bobina. La corriente que circula a través de la bobina, que es la medida por el mecanismo, supera fácilmente la pequeña oposición que ofrece la corriente del armazón. Sin embargo, el movimiento de la bobina se amortigua rápidamente.

La amortiguación del mecanismo del medidor puede también realizarse por medios mecánicos, según puede verse en la parte inferior del mecanismo móvil de la figura 6-5. La placa unida al eje está encerrada en una cámara semi-hermética. Sólo queda espacio suficiente para permitir el libre movimiento entre la placa y la pared de la cámara. El aire semicomprimido se opone a cualquier desplazamiento rápido de la placa amortiguadora, y suprime así toda tendencia de la aguja a la oscilación.

Sensibilidad y precisión del mecanismo medidor

La sensibilidad de un mecanismo medidor, como se ha expresado en el capítulo III, depende de la intensidad de corriente necesaria para accionar el elemento móvil del medidor. Se considera que el mecanismo que requiera la menor cantidad de corriente para obtener una máxima desviación de la aguja es el más sensible. La intensidad de corriente necesaria para obtener una desviación máxima depende del número de vueltas de alambre de la bobina móvil. Cuanto más vueltas se agregan, más intenso es el campo magnético que se crea, lo que exige menos corriente para obtener la desviación máxima. Toda bobina de instrumento tiene un valor de resistencia perfectamente definido, el cual depende del número de vueltas de la bobina y del grosor de alambre utilizado. La resistencia ofrecida por la bobina del mecanismo, se llama *resistencia interna* del instrumento. La sensibilidad y resistencia interna de cualquier medidor son características definidas del mecanismo, y no pueden ser alteradas sin cambiar la construcción original del instrumento.

La precisión de los mecanismos medidores a bobina móvil puede variar desde un décimo (0,1) por ciento hasta un dos por ciento. Un instrumento con una precisión del dos por ciento se considera como un medidor de tipo general. La precisión en porcentaje se refiere a las indicaciones máximas, en cada alcance. Cuanto menor sea el valor indicado por la escala, tanto mayor será el porcentaje de inexactitud. La mayoría de los instrumentos, sin embargo, tienen un mayor grado de precisión que el garantizado por sus fabricantes. Debe recordarse que la precisión de las indicaciones de corriente y tensión en los instrumentos a bobina móvil tiende a ser mayor a medida que los valores se toman próximos al máximo de la escala.

6-3 EL AMPERÍMETRO BÁSICO

La aplicación, las precauciones a observar y el circuito fundamental de un amperímetro, se han visto al explicar el uso de instrumentos de medición (sec. 3-2). El texto siguiente explicará los métodos utilizados para determinar los valores correctos de las partes del circuito de un amperímetro.

Resistencias en paralelo del amperímetro

La determinación del valor correcto de la resistencia en paralelo o shunt de un amperímetro para diferentes mecanismos medidores e intensidades de corriente, se efectúa mediante la ley de Ohm aplicada como a los circuitos en paralelo.

La figura 6-7 muestra un problema típico de cálculo de la resistencia de un amperímetro. El mecanismo medidor tiene una sensibilidad de un miliampere en la zona de mayor desviación de la escala. Se desea conectar un shunt en paralelo para incrementar la capacidad de indicación del mecanismo hasta 10 miliampere. Es decir, que

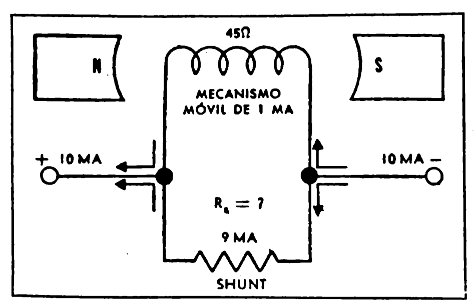


Figura 6-7. Cálculo de la resistencia shunt para extender el alcance del amperímetro

siendo un instrumento para medir en el alcance de 0-1 amp, se desea agregarle un nuevo alcance de 0-10 amp.

Como el mecanismo puede trabajar con un miliampere solamente, los nueve miliampere que faltan para completar los diez requeridos, deberán pasar por el shunt.

Si se emplean símbolos comunes se obtiene la ecuación de las corrientes:

$$I_s = I_t - I_m \qquad (6\text{-}1)$$

donde:

I_s = corriente que fluirá por el shunt.
I_t = corriente total a ser medida.
I_m = corriente que fluirá por el medidor.

Puesto que se conoce la resistencia interna del medidor que es de 45 ohm, la resistencia del shunt debe tener 1/9 de su valor, es decir, 5 ohm para llevar la corriente requerida.

Para probar la aseveración anterior, se debe considerar lo siguiente: si se sabe que la corriente por el medidor es un miliampere y su resistencia es de 45 ohm, la caída de tensión a través del medidor puede calcularse por la ley de Ohm, en la siguiente forma:

$$E = I_m \times R_m \qquad (6\text{-}2)$$
$$= 0{,}001 \times 45$$
$$E_m = 0{,}045 \text{ volt}$$

Puesto que se conoce la tensión a través del circuito (mecanismo del medidor y de la resistencia en paralelo), la aplicación de la ley de Ohm nos permite calcular el valor requerido de resistencia en paralelo.

$$R_s = \frac{E_s}{I_s} \qquad (6\text{-}3)$$
$$= \frac{0{,}045}{0{,}009}$$
$$R_s = 5 \text{ ohm}$$

Por sustitución matemática, puede establecerse una fórmula general para determinar la magnitud necesaria de resistencia en paralelo para un medidor, siempre que se conozca la corriente que fluye por ella. La fórmula general es:

$$R_s = \frac{I_m \, R_m}{I_s} \qquad (6\text{-}4)$$

Esta fórmula se encuentra en muchos libros de ingeniería electrónica, para el cálculo de resistencias de corriente fija. Hay variaciones de esta fórmula que pueden usarse con igual facilidad. Una de las variaciones más comunes es la siguiente:

$$R_s = \frac{R_m}{N - 1} \qquad (6\text{-}5)$$

donde:

N = relación entre la indicación máxima de la escala nueva, y la máxima de la escala vieja.

El uso de cualquiera de las fórmulas de cálculos de resistencias en paralelo para medidores, dará el valor correcto de la resistencia a agregarse en paralelo con el movimiento del medidor, para aumentar su capacidad de medida de corriente.

Como ejemplo, considérese el movimiento del medidor de la figura 6-7 a emplear en un amperímetro de alcances múltiples en los alcances: 0-1; 0-10; 0-25; y 0-50 ma. A continuación se indica el cálculo de las resistencias necesarias para los alcances 0-25 y 0-50 ma, usando la fórmula general para resistencias en paralelo.

$$R_S = \frac{I_m \, R_m}{I_S}$$
$$= \frac{45 \times 10^{-3}}{25 \times 10^{-3}}$$
$$R_S = 1{,}8 \text{ ohm}$$
$$R_S = \frac{R_m}{N - 1}$$
$$= \frac{45}{49}$$
$$R_S = 0{,}9 \text{ ohm}$$

Para lograr alcances múltiples en muchos medidores es común utilizar un mismos resistor con varios puntos de conexión. En este tipo, parte de la resistencia puede quedar en serie o en paralelo con el movimiento del medidor, según sea el alcance seleccionado. En la figura 6-8 A se puede ver el circuito de un miliamperímetro simplificado de alcance múltiple que usa resistencia con varias derivaciones: Si se observa esta figura, debe notarse que para la escala más baja, 10 miliampere, el valor total de la resistencia se aplica sobre el mecanismo del medidor. Esto indica que la sensibilidad del medidor es mayor a 10 miliampere (menor corriente, mayor sensibilidad).

La parte B de esta figura muestra la resistencia en paralelo, para alcances de 10 miliampere, en dibujo similar al utilizado para describir una resistencia fija en paralelo. Observando la figura se puede ver que los resistores R_1, R_2 y R_3, representan la resistencia total necesaria para indicar 10 miliampere en la máxima desviación. Los valores de los resistores (resistores en serie R_1, R_2 y R_3) la resistencia interna del mecanismo medidor, y la escala de corrientes, son los mismos que los que muestra la figura 6-7. Por lo tanto, el valor de la resistencia total en el medidor (suma de resistores en serie) es de 5 ohm. Para pasar al alcance superior, la aguja debe desplazarse hasta la posición de los 25 ma, lo cual se traducirá en una reordenación de la disposición general del circuito, según se muestra en la parte C de la figura 6-8. Ahora se puede observar que R_1 y R_2 están en serie, y forman la resistencia del medidor y R_3. Con esta disposición del circuito es imposible usar la fórmula para calcular una resistencia fija en paralelo, puesto que se desconocen los valores de las resistencias individuales.

Puede deducirse una fórmula, basada en las leyes para circuitos en paralelo, para establecer la relación entre corrientes y resistencias, a fin de determinar los valores de resistencia del circuito. Esta fórmula es:

$$R_s = \frac{R_{sum}\, I_m}{I_t}$$

donde:

R_s = Valor total de la resistencia.

R_{sum} = Suma de las dos resistencias en paralelo. (Recuérdese la relación de dos resistencias en paralelo: Resistencia total es igual al producto de ambas resistencias, dividido por su suma.)

I_m = Máxima corriente circulante por el mecanismo medidor.

I_t = Nuevo valor máximo de corriente de la escala.

Si se sustituyen valores para el alcance de 25 ma

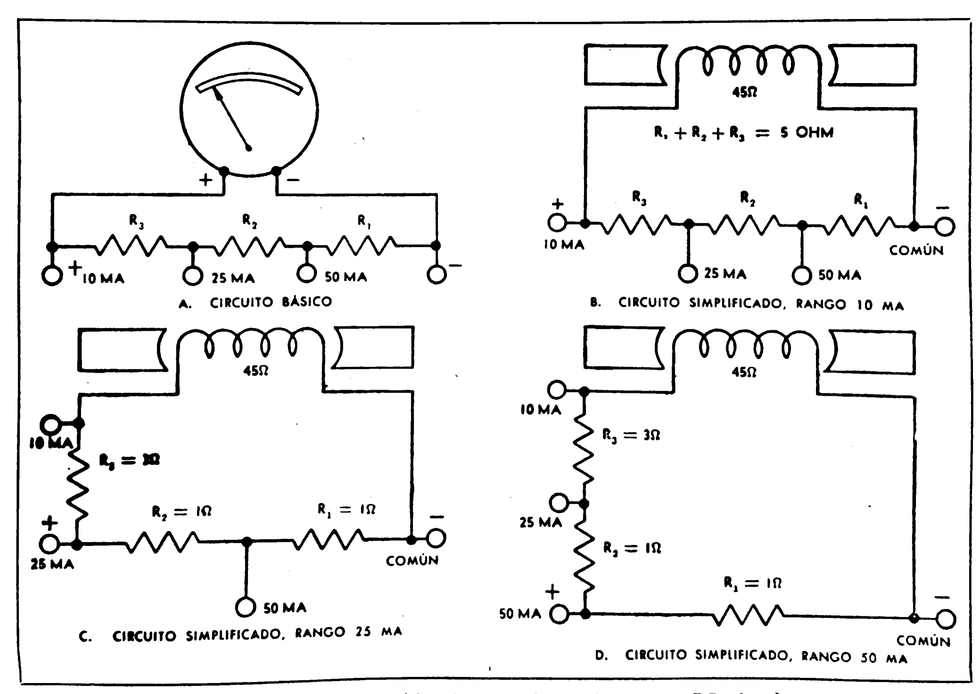


Figura 6-8. Circuito esquemático de un miliamperímetro de C.C. de alcance múltiple; shunt con derivaciones

$$R_s = \frac{50 \times 1 \times 10^{-3}}{25 \times 10^{-3}}$$
$$= \frac{50}{25}$$
$$R_s = 2 \text{ ohm}$$

En consecuencia, los valores de la serie R_1 y R_2 es de 2 ohm. Puesto que la resistencia total de los 3 resistores en serie es de 5 ohm, el valor de R_3 será de 3 ohm.

En la parte D de la figura 6-8, se puede ver que para medir la máxima deflexión 50 ma, el medidor consiste solamente de R_1. Sustituyendo el nuevo valor total de corriente en la ecuación, puede hallarse directamente:

$$R_s = \frac{50 \times 1 \times 10^{-3}}{50 \times 10^{-3}}$$
$$= \frac{50}{50}$$
$$R_s = 1 \text{ ohm}$$

Puesto que el valor de R_1 es 1 ohm y el valor de R_3 es 3 ohm, R_2 será 1 ohm puesto que el total de estas resistencias debe ser de 5 ohm.

La construcción de las resistencias en paralelo varía según la cantidad de corriente que deba aplicárseles. En las aplicaciones normales de pruebas de equipos, donde la corriente es pequeña, las resistencias generalmente se fabrican con pequeños trozos de aleaciones de alambre con alto coeficiente de resistividad, como el *nicrom* o *manganina*, arrollados sobre forma de plástico. En los casos donde la corriente a medir es grande, las resistencias se construyen de placas de *manganina* montadas en bloques de cobre. La *manganina* es el material utilizado más comúnmente por su bajo coeficiente de variación de resistencia con la temperatura. Un coeficiente bajo de variación de R con la temperatura, indica que el valor de la resistencia en paralelo varía sólo levemente cuando se producen grandes variaciones de temperatura.

Efecto de carga de los amperímetros

Puesto que un amperímetro siempre debe conectarse en serie en el circuito, la caída de tensión sobre el mecanismo constituye una pérdida de tensión en el circuito medido. Cuando un amperímetro se conecta en un circuito donde la resistencia total es pequeña, se reduce apreciablemente la corriente en el circuito. Este efecto es conocido como *efecto de carga*.

Para mostrar el efecto de carga causado por un amperímetro, se supone que debe medirse la corriente en los circuitos en serie de la parte A de la figura 6-9. Es evidente, por la ley de Ohm, que

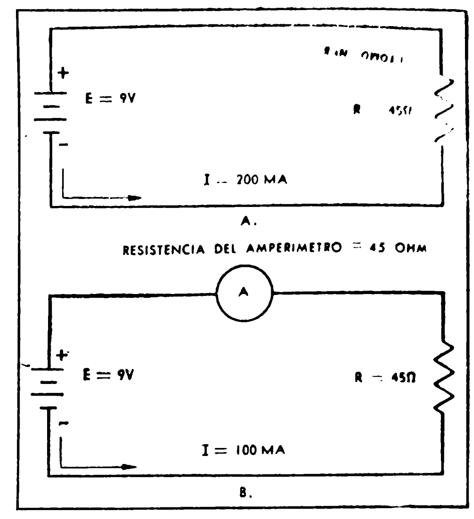


Figura 6-9. Ilustración del efecto de carga de un amperímetro

con una batería de 9 volt conectada a resistencias en serie de 45 ohm circulará una corriente de 200 miliampere. Cuando se conecte un amperímetro que tenga una resistencia interna de 45 ohm a este circuito, la resistencia del amperímetro (R_a) se sumará a la resistencia del circuito (R_c) y, en consecuencia, provocará una disminución de la corriente del circuito a 100 miliampere (B de la figura). Se tendrá:

$$R_t = R_c + R_a = 45 + 45 = 90 \text{ ohm}$$

por lo tanto:

$$I = \frac{E}{R_t} = \frac{9 \text{ volt}}{90 \text{ ohm}} = 0{,}1 \text{ A} = 100 \text{ ma}$$

En un circuito donde se requiere una cierta cantidad de flujo de corriente, para lograr un funcionamiento eficiente, la inserción de un amperímetro aumentará la *carga* del circuito, con lo que se reducirá el valor de la corriente que fluye en el circuito. Como resultado de esto, sucederá que el circuito dejará de funcionar o lo hará mal.

Asimismo, es de igual importancia el hecho de que el valor de corriente indicado por el amperímetro, no es el de la corriente que circula en el circuito sin el instrumento colocado. En los circuitos donde los amperímetros deben quedar conectados permanentemente, la carga extra que proporciona el amperímetro se compensa en el diseño del circuito, de tal forma que el valor indi-

cado de la corriente es el que corresponde al funcionamiento correcto del circuito. Cuando se emplee un amperímetro para probar un circuito en funcionamiento, debe considerarse el valor de la resistencia del amperímetro (movimiento y resistencia en paralelo) para asegurarse de que el error que se comete es despreciable. En efecto, cuando la resistencia interna del amperímetro es muy pequeña en comparación con la resistencia normal del circuito, el efecto de carga es reducido y generalmente se puede dejar de lado. Por esta razón, se busca en la construcción de los amperímetros, que su resistencia interna se mantenga en el valor más bajo posible.

Rectificadores para amperímetros de corriente alternada

Anteriormente se describieron los amperímetros como aparatos de medición para corriente continua. El estudio sobre resistencias en paralelo y otros importantes factores, ha sido relacionado al medidor del tipo de bobina móvil.

Al hablar de mecanismos medidores, se dijo que los mecanismos de hierro móvil y dinamómetros tenían capacidad para medir valores relativamente altos de corriente alternada. En la mayoría de las mediciones en electrónica, los valores de corriente a medir son pequeños; por lo tanto, interesa que los instrumentos de medida sean de una sensibilidad relativamente alta. El mecanismo de bobina móvil, según se explicó, es capaz de producir la sensibilidad requerida, pero funciona sobre la base de que la corriente debe pasar a través del mecanismo en una sola dirección. Por medio de un componente adicional, puede usarse el mecanismo móvil de D'Arsonval para medir corriente alternada. Dicha parte se llama *rectificador* y tiene la función de transformar la corriente alterna en continua.

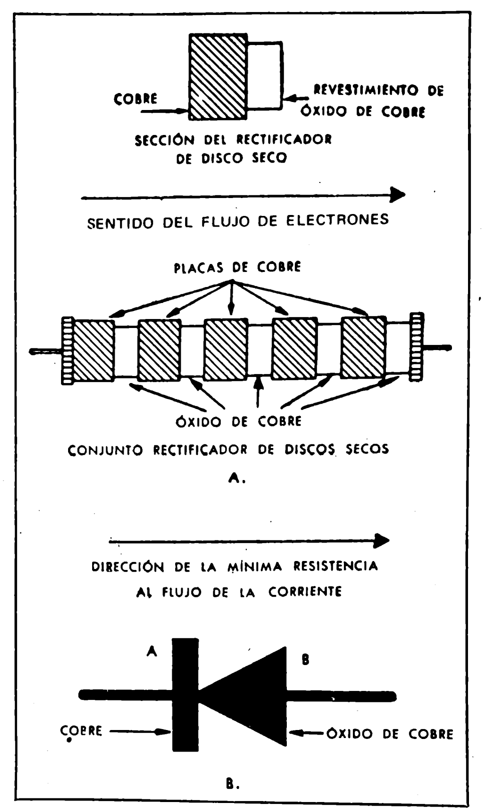


Figura 6-10. Construcción y diagrama esquemático de un rectificador de discos secos de óxido de cobre

Un rectificador típico que se aplica al mecanismo de D'Arsonval, se construye con placas de cobre y óxido de cobre, según muestra la figura 6-10. El rectificador de óxido de cobre consta de una lámina de cobre con un revestimiento de óxido de cobre en una cara. Las propiedades de este rectificador permiten que la corriente fluya en un sentido (del cobre hacia el óxido) con facilidad, y se oponen a que fluya en dirección opuesta (del óxido hacia el cobre). Cada sección del rectificador es capaz de soportar una caída de tensión de unos once volt. Una caída de tensión mayor que la citada dañaría la unidad rectificadora. Cuando se requiera un rectificador para usarlo con mayores tensiones, las secciones se conectan en serie, según se observa en la figura 6-10 A. Esta disposición en serie permite soportar mayores tensiones puesto que las caídas de tensión individuales de cada sección son aditivas.

Simbólicamente, el rectificador de óxido de cobre se representa como una punta de flecha en un rectángulo. La primera representa el óxido de cobre y el segundo, el cobre (ver fig. 6-10 B).

En la figura 6-11, se supone que se aplica una corriente alternada a los terminales A y B. En determinado momento, A será el terminal negativo y B el positivo, y la corriente tendrá el sentido de la flecha de trazo uniforme. Como el rectificador ofrece poca o ninguna resistencia en esta dirección, la corriente fluirá a través de la bobina móvil del medidor, y desviará la aguja. Cuando la corriente alterna cambia de dirección, el terminal A se torna positivo, y el B negativo. La

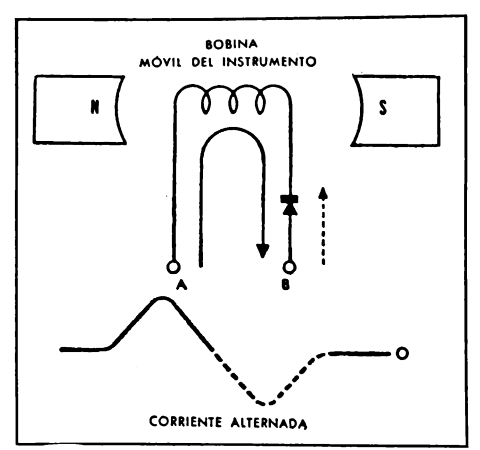


Figura 6-11. Flujo de corriente cuando se inserta un elemento rectificador en un circuito

corriente tenderá ahora a circular en la dirección de la flecha de puntos. Sin embargo, como el rectificador ofrece una resistencia considerable al paso de corriente en esa dirección, muy poca o ninguna corriente pasará a través de la bobina móvil. Al instante siguiente volverá a hacerse A negativo y B positivo, con lo que se repetirá el proceso y circulará nuevamente corriente.

Dada la rápida repetición del proceso, la aguja, a nuestra vista, quedará igualmente marcando, en los instantes en que no circula corriente por el instrumento.

Sin embargo, es posible lograr que circule corriente a través de la bobina móvil del mecanismo medidor, durante ambas alternaciones de la corriente, y ello se logra con la disposición del circuito rectificador de la figura 6-12. Los cuatro rectificadores que se observan, forman un circuito que se denomina "puente". La acción rectificadora del circuito puente es fundamentalmente la misma que la del rectificador. Si se supone que la polaridad de la corriente en la primera alternación es tal que el terminal X es positivo, y el terminal Y, negativo, como la corriente sigue siempre el camino de resistencia mínima, circulará desde el terminal Y, a través del rectificador D, el mecanismo de bobina móvil y el rectificador A, volviendo al terminal X. El paso de corriente para esta alternación se indica en la figura con flechas punteadas. Durante la siguiente alternación, la polaridad de la corriente en los terminales se invierte y el paso de la resistencia mínima se indica por flechas punteadas. Se debe notar que durante ambas alternancias, aunque se ha invertido el flujo de la corriente en los terminales, la corriente de la bobina móvil del mecanismo se ha mantenido igual. En consecuencia, por medio del uso de un circuito rectificador puente, el mecanismo D'Arsonval puede usar las alternaciones positivas y negativas de la corriente alternada y por eso provee una indicación más exacta de la intensidad de la corriente alternada en el circuito.

La sensibilidad en este tipo de medidor es la misma que la del mecanismo del medidor. Sin embargo, como los rectificadores proveen una impedancia en serie, el efecto de carga del amperímetro de la combinación es más grande que el del mecanismo del medidor. Para aumentar la capacidad de medida de corriente de los amperímetros de corriente alternada, también se emplean resis-

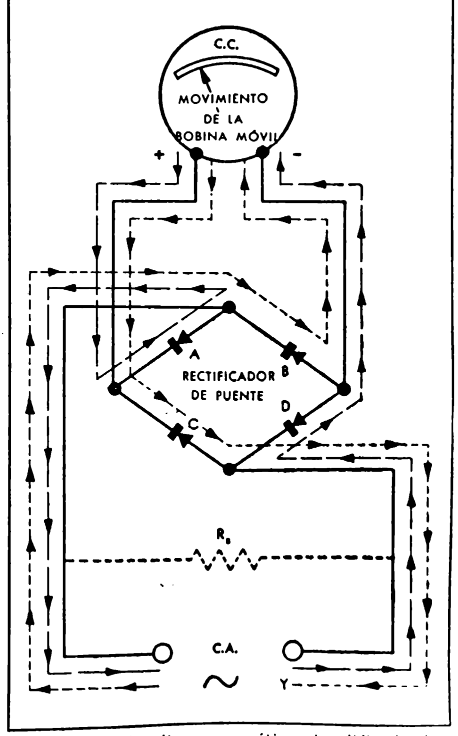


Figura 6-12. Circuito esquemático simplificado de un amperímetro C.A. usando un puente rectificador

tores en paralelo. En los amperímetros de corriente alternada, los shunts se colocan a través del elemento rectificador y del mecanismo del medidor, como se indica con la resistencia R_s marcada con trazos fuertes en la figura 6-12.

La ventaja de medir la corriente alternada de esta manera, es que la escala de la bobina móvil es lineal y no comprimida en una punta como en las escalas de los instrumentos a hierro móvil o dinamómetro. La desventaja reside en que la precisión está en más o en menos del 5 % del valor real de la corriente alternada. Esta inexactitud se debe a los efectos de los cambios de temperatura sobre el elemento rectificador. El instrumento del tipo que usa rectificador para corriente alternada es muy valioso, si se consideran sus limitaciones cuando se lo utiliza.

La combinación del medidor d'Arsonval y el rectificador es la única manera práctica de medir valores pequeños de corriente alternada, pues es aproximadamente 50 veces más sensible que los instrumentos de dinamómetro o hierro móvil.

6-4 VOLTÍMETRO

Hemos visto anteriormente el manejo adecuado del tipo fundamental de voltímetro y las características de sus partes esenciales. La información siguiente presentará el método para computar los valores del circuito del voltímetro.

Multiplicadores del voltímetro

Un voltímetro es, en esencia, un mecanismo medidor conectado en serie con una resistencia multiplicadora de alto valor óhmico. Esta resistencia debe ser suficiente para limitar la corriente a través del mecanismo medidor a un valor no peligroso, cuando el instrumento se conecta a una fuente de tensión. La figura 6-13 muestra la conexión de un resistor multiplicador en serie con un mecanismo medidor.

Como el mecanismo medidor y el resistor multiplicador forman un circuito en serie, el valor del multiplicador puede determinarse aplicando la ley de Ohm para circuitos en serie. Por ejemplo, el medidor de la figura 6-13 tiene una resistencia de 45 ohm y una desviación a plena escala de 1 miliampere. Se desea utilizar este medidor en un voltímetro con alcance de 0-10 volt. Para calcular el valor de la resistencia multiplicadora, es necesario determinar primero la resistencia total del circuito. Como un miliampere produce la desviación máxima de la aguja indicadora, la resistencia total del circuito, R_t, debe ser tal que la caída de tensión a través de la misma, sea de 10 volt cuando circula un miliampere. Luego:

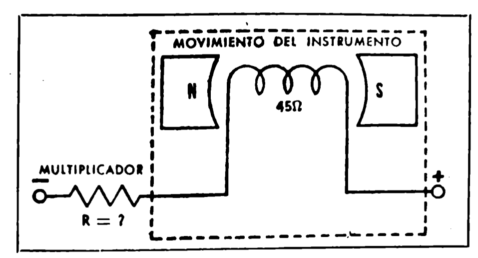


Figura 6-13. Conexión de un multiplicador en serie con el movimiento del instrumento

$$R_t = \frac{E_{\text{máxima de la escala}}}{I_{\text{máxima de la escala}}} \quad (6\text{-}7)$$

$$= \frac{10}{0.001}$$

$$R_t = 10.000 \text{ ohm}$$

El valor de la resistencia multiplicadora requerida es sencillamente el resultado de la diferencia entre la resistencia del mecanismo (conocida) y la resistencia total del circuito (calculada).

Se puede deducir una fórmula general a partir de la información precedente para determinar el valor de las resistencias multiplicadoras fijas. Esta fórmula es:

$$R_{mult} = \frac{E_{(\text{máxima de la escala})}}{I_{(\text{máxima de la escala})}} - R_{(\text{del medidor})} \quad (6\text{-}8)$$

Para ilustrar el uso de esta fórmula, se supone que el mecanismo de la figura 6-13 debe utilizar-

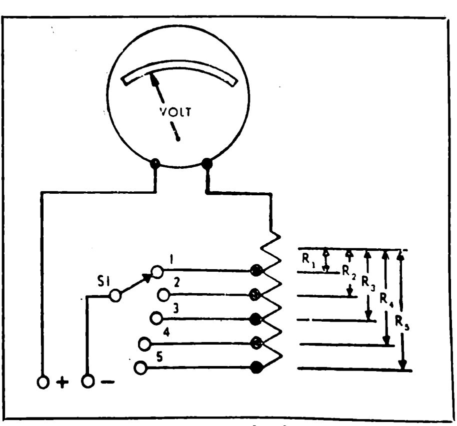
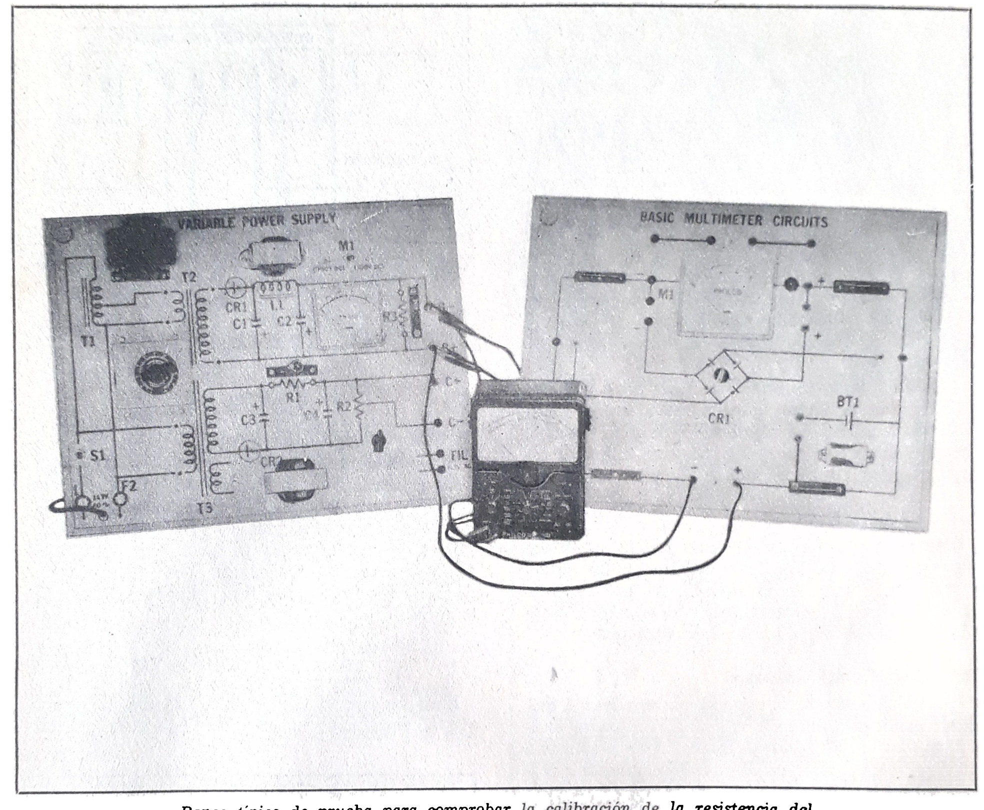


Figura 6-14. Voltímetro de alcance múltiple; resistores con derivaciones



Banco típico de prueba para comprobar la calibración de la resistencia del multiplicador variable con un patrón secundario

se para la medición de tensiones desde 0 hasta 250 volt.

Sustituyendo:

$$R_{mult} = \frac{250}{1 \times 10^{-3}} - 45$$

$$= 250.000 - 45$$

$$R_{mult} = 249.955 \text{ ohm}$$

Mediante la aplicación de esta fórmula, pueden calcularse los valores de las resistencias multiplicadoras para un voltímetro de alcances múltiples en cualquier grupo de alcances deseado.

Los tipos de resistores utilizados comúnmente como multiplicadoras son de carbón o de alambre. Los resistores de alambre devanado están hechas generalmente con alambre de manganina arrollado sobre carretes cerámicos o plásticos. La precisión de estas resistencias es generalmente del orden de ± 0,1 por ciento. Los resistores de carbón pueden usarse para instrumentos menos costosos, donde no se requiere mucha precisión.

En la figura 6-14 se puede ver el circuito de un voltímetro de alcances múltiples. Para los multiplicadores se usa un solo resistor con derivaciones fijas, en vez de varios resistores de valor fijo. El valor de la resistencia de cada conexión puede determinarse usando los procedimientos explicados anteriormente. Cada acción de la resistencia de derivaciones fijas debe agregar la resistencia adicional necesaria para cada alcance de tensión, puesto que las resistencias de la sec

ción están en serie. Esto elimina la necesidad de utilizar varios resistores de distintos valores

Grado de sensibilidad del voltímetro

El grado de sensibilidad de un voltímetro indica la cantidad de resistencia necesaria para limitar la corriente y la máxima desviación de la aguja por la aplicación de 1 volt.

La sensibilidad de un voltímetro, expresada en *ohm* por volt, es el cociente entre la resistencia total del circuito del medidor (multiplicadores y resistencia interna) y la máxima de la escala en volt.

Como ejemplo, para determinar el grado de sensibilidad (S_r) del voltímetro de la figura 6-13 en el alcance de 0-10 volt, se tendrá que si el valor de la resistencia total del circuito (multiplicadores y resistencia interna) es 10.000 ohm, entonces el grado de sensibilidad será:

$$S_r = \frac{R}{E} = \frac{10.000}{10} \qquad (6\text{-}9)$$
$$S_r = 1000 \text{ ohm por volt}$$

Este grado de sensibilidad se mantendrá constante para todos los alcances de este instrumento que tomamos como ejemplo, puesto que la resistencia total del circuito medidor depende de la resistencia interna del medidor, y de la corriente necesaria para obtener la desviación máxima de la aguja.

Puesto que el grado de sensibilidad de cualquier instrumento depende de las características del mecanismo medidor, un método sencillo para determinar la sensibilidad consiste en dividir un volt por la deflexión máxima de corriente que indica la escala.

Por ejemplo, si se supone que un mecanismo medidor requiere 50 microampere para obtener la máxima desviación de la aguja, la sensibilidad será:

$$S_r = \frac{E}{I} = \frac{1}{50 \times 10^{-6}}$$
$$S_r = 20.000 \text{ ohm por volt}$$

La sensibilidad de un voltímetro, en ohm por volt, es siempre mayor que 1, y, a mayor sensibilidad del mecanismo medidor, mayor grado de sensibilidad del instrumento. El grado de sensibilidad de los voltímetros comunes varía desde 1.000 a 25.000 ohm por volt. El instrumento que posea un mayor grado de sensibilidad, permitirá siempre efectuar mediciones de tensión más exactas.

Efecto de carga de los voltímetros

Cuando se utiliza un voltímetro para medir tensiones, debe conectarse en paralelo con la porción de circuito a medir. A causa de esta conexión, puede resultar afectado el circuito. El efecto en el funcionamiento del circuito puede traducirse en errores en las indicaciones del voltímetro, según sea la sensibilidad del medidor. El error en la lectura se debe al *efecto de carga* que el medidor tiene sobre el circuito en el cual se está midiendo la tensión.

Para comprender mejor los efectos de la carga del voltímetro, se observará el circuito de la figura 6-15. El circuito original puede verse en la parte A de la figura, en la que están todos los valores conocidos del circuito. Sería de esperar que cuando el voltímetro está colocado a traves del resistor R_2, la indicación fuese de 200 volt. Sin embargo, según el grado de sensibilidad del voltímetro, ésta puede indicar otros valores. Por ejemplo, obsérvese que el medidor utilizado en la parte A de la figura tiene una sensibilidad de 1.000 ohm por volt. En la escala 0-250 volt, la resistencia del circuito medidor es de 250.000 ohm. Con el voltımetro conectado a través de R_2, queda formado un circuito paralelo con una resistencia efectiva de 111.000 ohm, según se

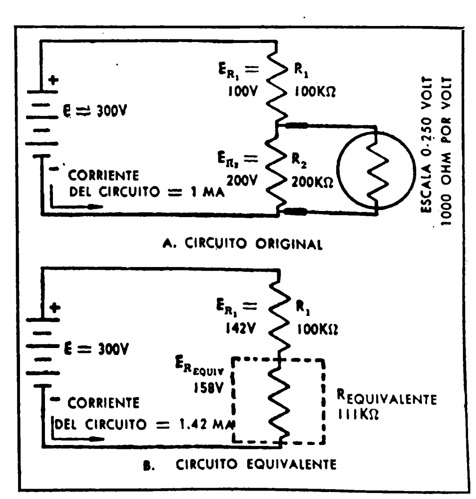


Figura 6-15. Ilustración de la carga de voltímetro cuando se utiliza un instrumento de 1.000 ohm por volt

observa en el recuadro punteado de la parte B de la figura. Como se indica en el circuito equivalente formado, la resistencia efectiva del circuito disminuirá, produciendo en esa forma un incremento de corriente de 1,42 ma. La caída de tensión producida en la R equivalente, según se calcula mediante la aplicación de la ley de Ohm, es 157,62 o 158 volt. Esta es la tensión que indicará el voltímetro. Luego, vemos que el efecto de carga del voltímetro ha producido un cambio de las características generales del circuito y una indicación errónea de la tensión del mismo. En algunos casos esta carga puede ser suficiente para alterar seriamente el funcionamiento del circuito.

Salta a la vista que si se colocase un medidor de mayor sensibilidad entre los puntos a medir, la resistencia efectiva del circuito paralelo se aproximaría al valor original. Si se compara la figura 6-15 con las partes A y B de la figura 16, respectivamente, se podrá apreciar esta relación. La conclusión obvia que se obtiene de los ejemplos enunciados es que un voltímetro de mayor grado de sensibilidad producirá menores efectos de carga, que se traducirán en una mayor precisión.

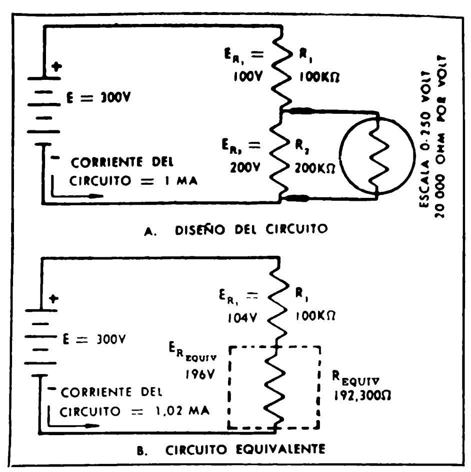


Figura 6-16. Ilustración de la carga del voltímetro cuando se utilizan 20.000 ohm por volt del instrumento

Rectificador para voltímetro de corriente alternada

La manera más práctica de medir bajas tensiones de corriente alternada, es combinar el sensible mecanismo móvil de D'Arsonval con un elemento rectificador. Este dispositivo es algo similar al amperímetro rectificador de corriente alternada, explicado anteriormente; la diferencia está en que se usan resistencias multiplicadoras y no en paralelo.

En la figura 6-17 se observa la disposición normal del circuito de un voltímetro con rectificador para corriente alternada. Este tipo de dispositivo usa un puente rectificador, el multiplicador y el voltímetro en serie, Una ventaja del uso del puente rectificador es que permite a la corriente circular por el medidor en el mismo sentido, en ambas alternancias de la tensión aplicada. Esto permite al medidor indicar con mayor precisión la tensión aplicada. El voltímetro de corriente alternada con puente rectificador tiene mayores ventajas que el electrodinamómetro y el instrumento a hierro móvil, para medir tensiones bajas de corriente alternada.

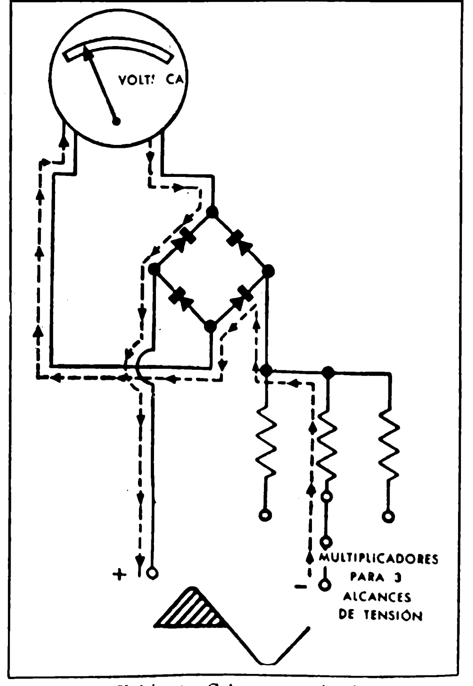


Figura 6-17. Voltímetro C.A. tipo rectificador en puente

6-5 ÓHMETROS

De acuerdo con la ley de Ohm, el flujo de corriente por un circuito es limitado por la resistencia del mismo. El manejo de un óhmetro está basado en dicho principio fundamental. El circuito de un óhmetro consiste en un mecanismo medidor

D'Arsonval, una batería y un resistor de valor conocido conectada en forma tal que por comparación puede medirse una resistencia desconocida agregada al circuito. La escala calibrada del medidor indicará un valor menor al total y, en consecuencia, indicará con ello la cantidad de resistencia adicional.

Óhmetros en serie

El modelo fundamental de óhmetro en serie fue explicado en el capítulo III. Pero, para asegurar un buen entendimiento del manejo del circuito puede verse la figura 6-18 que muestra un óhmetro en serie típico, de doble alcance. Las partes del circuito se conectan en serie, incluso la resistencia bajo prueba, lo que proporciona un solo trayecto para el flujo de corriente. Cuando se abren las puntas de prueba no fluye la corriente por el instrumento, y la aguja en posición de descanso tiene la misma resistencia o posición infinita. Cuando las puntas de prueba se ponen en cortocircuito habrá una desviación máxima de la aguja indicando así una resistencia nula. El propósito de R_c es limitar la corriente por el circuito del medidor al valor de la máxima escala, y el ajuste a cero-ohm se utiliza para permitir el ajuste y compensar los cambios en el potencial de la batería.

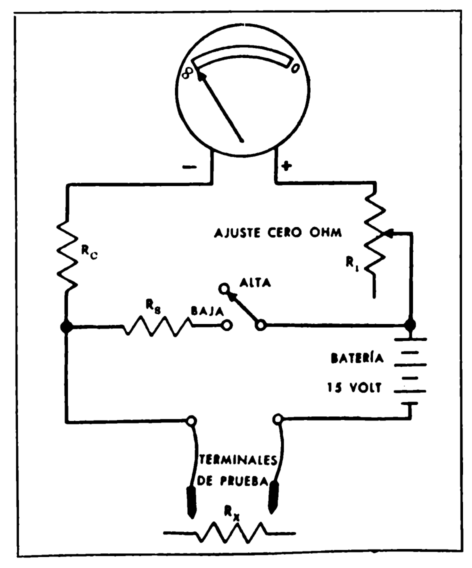


Figura 6-18. Óhmetro simple de dos alcances

En el diagrama de la figura 6-18 hay otro componente, R_s, el cual se inserta en el circuito como selector de resistencia de alcance más bajo. Para entender el funcionamiento del circuito y del resistor en paralelo R_S, obsérvese la figura 6-19. La parte A de esta figura es una representación del circuito del óhmetro. El resistor R_t representa la resistencia total del circuito que incluye el resistor de máxima limitación de corriente, el mecanismo del medidor y el ajuste a cero. Esta resistencia total, cuando es colocada en serie con una batería de 15 volt, permite que una corriente de 1 ma mueva el mecanismo a la máxima deflexión en la escala. Si se coloca un resistor adicional de 15.000 ohm en serie con R_t, la corriente decrecerá a la mitad de su valor anterior o sea 0,5 ma. Este descenso se produce debido a que la resistencia total del circuito se ha duplicado.

Observando la parte C de la figura, R_t representa la resistencia total del circuito y R_s representa una resistencia adicional que ha sido colocada en paralelo con R_t. El valor de R_s es tal que la resistencia efectiva de las dos ramas resulta aproximadamente de 1.500 ohm. Como la tensión de la batería permanece constante, la corriente circulante aumentará; sin embargo, la corriente que circula por R_t seguirá siendo de 1 ma. Si se coloca una resistencia adicional de 1.500 ohm (R_x) en serie con esta resistencia efectiva, según se ve en la parte D de la figura, las corrientes en las ramas disminuirán hasta la mitad de su valor original. Esto significa que la corriente que circula por la rama R_t caerá desde 1 ma hasta 0,5 ma, haciendo que la aguja del aparato deflecte a media escala.

Si en la figura 6-19 D la escala fuera calibrada para indicar 1.500 ohm al señalar la aguja el centro de la misma, el valor R_x, en la parte B de la figura, lo indicará directamente en la escala. Si esta misma calibración de la escala se utiliza para indicar el valor de R_x en la parte B de la figura, la indicación de la misma debería ser aumentada por un factor de 10. En este ejemplo podría utilizarse la típica escala de óhmetro presentada en la fig. 3-14 del capítulo 3. En estas condiciones, las indicaciones de alcance para baja y alta, ilustradas en la figura 6-18, se podrían cambiar para indicar Rx100 y Rx1000, respectivamente. El óhmetro serie de uso más común está provisto generalmente de tres alcances Rx1, Rx100 y Rx10.000. Estos tres alcances bastan para satisfacer las necesidades más comunes; sin embargo, resulta difícil obtener valores exactos de resistencias muy bajas. Como ejemplo tenemos la baja resistencia a la corriente continua de algunas bobinas y otras partes simi-

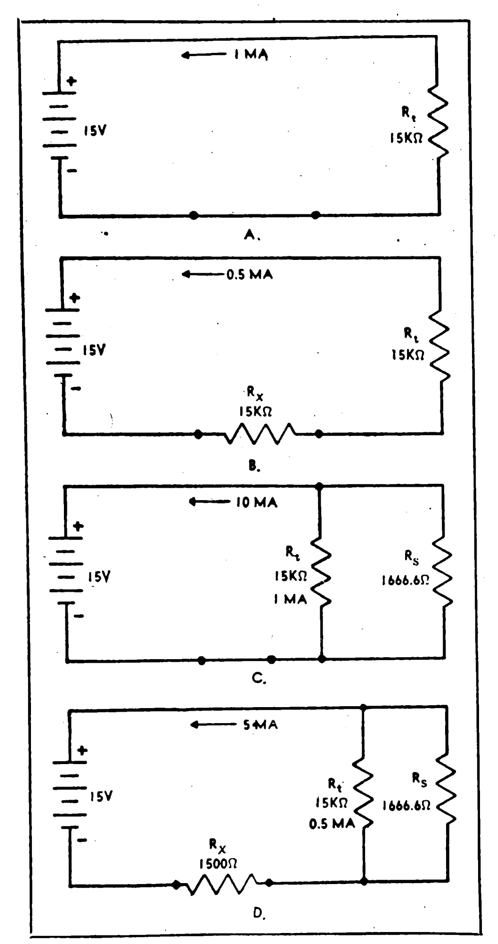


Figura 6-19. Análisis del óhmetro de dos alcances

lares de un equipo electrónico. Para medir con exactitud bajas resistencias se usa otro tipo de circuito para el óhmetro.

Ohmetros en paralelo

En la fig. 6-20 se muestra un circuito típico de un óhmetro shunt o paralelo. Nótese que este circuito consiste esencialmente en las mismas partes que el tipo de óhmetro serie, con la excepción de que la resistencia a medir se coloca en paralelo con el movimiento del medidor en lugar de hacerlo en

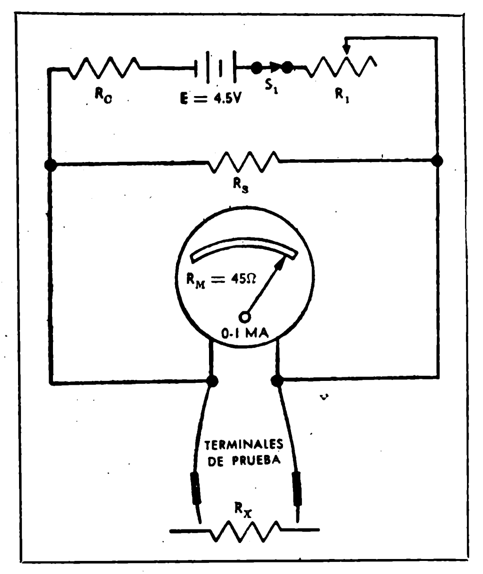


Figura 6-20. Circuito del óhmetro, tipo "shuntado" o derivado

serie. R_c actúa como resistor limitador de corriente, y R_1 control de ajuste de ohm, provocará la máxima desviación en el medidor. R_s es una resistencia en paralelo que ensancha la indicación en los alcances bajos.

Aunque el circuito parece simple, es un poco confuso seguir el mecanismo cuando se inserta R_x. Con la figura 6-21, podemos ver el funcionamiento de un óhmetro paralelo. La parte A de la figura es un circuito del óhmetro en nuevo diseño para ilustrar mejor los pasos en serie y en paralelo de la corriente. Todos los elementos del circuito son los descritos anteriormente, excepto que el mecanismo del medidor lo representa el resistor R Se puede ver entonces que el resistor y el mecanismo del medidor forman un circuito en paralelo, cuya resistencia en este circuito en paralelo es de 9 a 1; en consecuencia, cualquier corriente que fluya dentro de este brazo se dividirá en la misma proporción. Como el mecanismo del medidor debe tener 1 ma de corriente para indicar la desviación máxima de la escala, la corriente a través de R_s será de 9 ma. La corriente total que fluye en las partes restantes conectadas en serie será de 10 ma. Puesto que se requieren 450 ohm para limitar el flujo de corriente a 10 ma

para 4,5 volt aplicados, el valor combinado de R_c más R_1 debe ser igual a 445,5 ohm. Puesto que el valor de R_c es 300 ohm, el valor necesario puede obtenerse colocando el potenciómetro R_1 en 145,5 ohm. Se notará que la corriente fluye por el mecanismo medidor constantemente y que R_1 puede regularse para que el movimiento del mismo indique a plena escala. También se nota que esta corriente fluye aun cuando las puntas de prueba están abiertas. Se obtendrá la máxima indicación de resistencia (infinito, ∞) cuando las puntas de prueba estén abiertas y la corriente por el mecanismo del medidor sea la máxima.

Cuando se conecta una resistencia externa (R_x) de 4,5 ohm a las puntas de prueba, como se muestra en la parte B de la figura, la resistencia efectiva del circuito en paralelo de 3 ramas se convierte en 2,25 ohm. La resistencia total en serie del circuito ha cambiado ahora de 450 ohm a 447,75 ohm. Se aplica la Ley de Ohm y se obtiene la corriente total del circuito que es de 10,05 ma.

Este aumento de corriente en el circuito total causará un cambio en las caídas de tensión a través de todos los elementos del circuito. La caída de tensión a través del circuito paralelo (R_s, R_m y R_x) se determina por la Ley de Ohm. Puesto que la resistencia efectiva de este circuito es ahora 2,25 ohm y la corriente total es 10,5 ma, la caída de tensión es:

$$E = I\,R$$
$$= 10{,}05 \times 10^{-3} \times 2{,}25$$
$$E = 22{,}6 \times 10^{-3} \text{ volt ó } E = 22{,}6 \text{ milivolt}$$

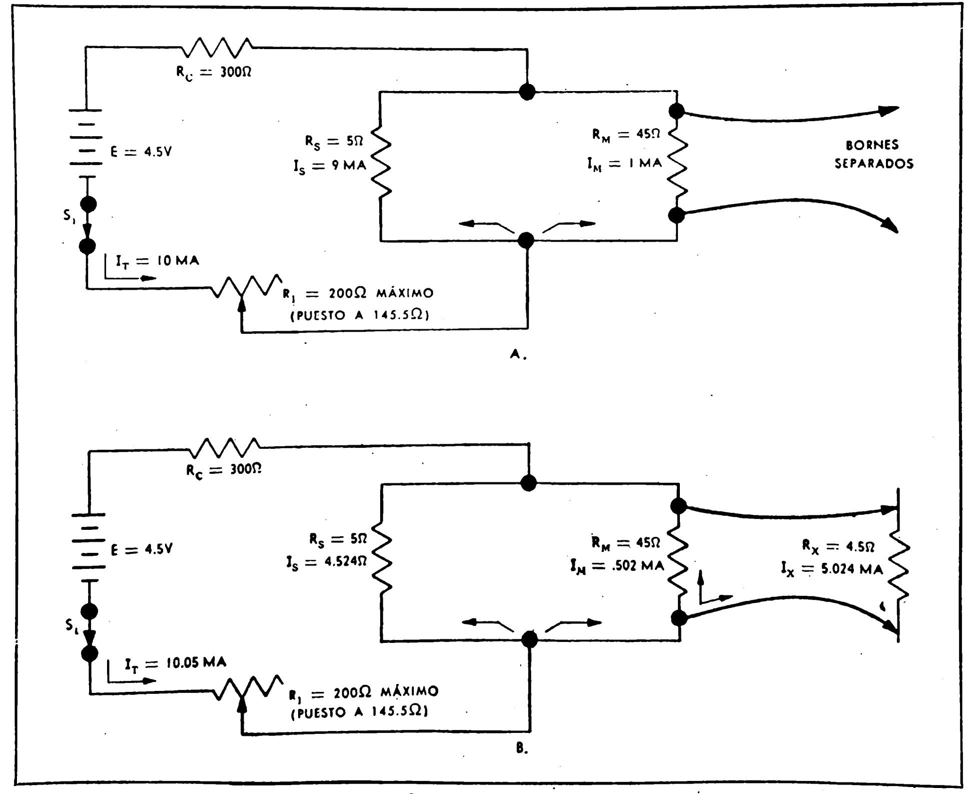


Figura 6-21. Análisis del funcionamiento del circuito del óhmetro tipo shunt

De acuerdo con las leyes establecidas para circuitos en paralelo, R_S, R_X y R_M aplicados sobre ellos 22,6 milivolt cada uno, y usando nuevamente la ley de Ohm, se puede encontrar la corriente que fluye por R_M, como sigue:

$$I_M = \frac{E_M}{R_M} = \frac{22{,}6 \times 10^{-3}}{45}$$

$I_M = 0{,}502 \times 10^{-3}$ ampere o $I_M = 0{,}502$ miliampere

Siendo así, con una resistencia R_x de 4,5 ohm, el mecanismo acusará una desviación hasta la mitad de la escala.

Si se consideran dos valores más de resistencia para R_x, suponiendo primero que una resistencia de 2,25 ohm está colocada entre las puntas de prueba, con los cálculos que siguen se halla nuevamente la corriente a través del medidor. La resistencia efectiva del circuito paralelo de tres ramas resulta ser de 1,5 ohm. Esta nueva resistencia efectiva hará que la resistencia total del circuito sea (445,5 + 1,5) ó 447,0 ohm. Con este valor de la resistencia total del circuito en serie con la batería, la intensidad total será 10,06 ma, y la caída de tensión a través del circuito será de 15 milivolt. Usando el valor de esta caída de tensión, la corriente a través de la resistencia R_M, puede determinarse así:

$$I_M = \frac{E_M}{R_M} = \frac{15 \times 10^{-3}}{45}$$

$I_M = 0{,}333 \times 10^{-3}$ ampere o $I_M = 0{,}333$ miliampere

Por lo tanto, cuando se coloca una resistencia de 2,25 ohm entre las puntas de prueba, el mecanismo medidor acusará una desviación de 1/3 de la escala. Si se considera que la tercera resistencia tiene un valor mayor que el de la resistencia efectiva de R_s y R_M, en este caso R_x tiene 30 ohm; resultará que utilizando el mismo procedimiento de los dos casos previos:

$R_{ef} =$ 3,91 ohm
$R_{total} =$ 449,4 ohm
$I_{total} =$ 10,01 miliampere
$E_m =$ 39 milivolt
$I_m =$ 0,87 miliampere

En consecuencia, cuando se colocan 30 ohm a través de las puntas de prueba, el medidor indicará aproximadamente 0,8 de su desviación máxima. La disposición de la escala del óhmetro tipo paralelo es opuesta a aquélla del óhmetro serie. El óhmetro paralelo tiene cero ohm del lado izquierdo, e infinito del lado derecho de la escala. De los ejemplos se deduce que este óhmetro puede usarse con mayor eficacia para valores de 30 ohm o menos, puesto que el alcance de resistencia representa poco más de 0,8 de la desviación máxima de la aguja indicadora. Esta escala se muestra en la figura 6-22 para compararla con las vistas anteriormente.

Instrumentos combinados serie-paralelo

Debido a que los óhmetros serie pueden medir valores de resistencia bajos, medianos y altos, y que el óhmetro paralelo mide con exactitud resistencias muy bajas, sus circuitos se combinan a menudo en un mismo instrumento.

Con un sistema de llaves adecuado y escalas calibradas apropiadas, el mecanismo medidor puede usarse como instrumento combinado. Este óhmetro combinado, generalmente se encuentra en laboratorios de investigación donde se hace necesario un conocimiento preciso de los valores bajos de resistencia. En la práctica, el instrumento múltiple, que emplea varios alcances, usa el circuito tipo serie, modificado levemente para poder efectuar mediciones exactas de resistencia de los alcances bajos y altos.

6-6 INSTRUMENTO MÚLTIPLE

El instrumento múltiple de uso más común es el tipo V-O-M, que significa volt-ohm-miliamperímetro. Tiene una caja compacta de metal, madera o bakelita, la que contiene todos los elementos del circuito que posibilitan su uso en varios alcances de medición de tensiones, corrientes y resistencias. El número de alcances varía con el tamaño y precio del instrumento. Las figuras 6-23 y 6-24 muestran una fotografía y un esquema del circuito de un instrumento múltiple típico. Con circuito simple o complejo, todos los multímetros poseen los siguientes elementos:

1. Mecanismo D'Arsonval.
2. Resistores multiplicadores para funcionar como voltímetro.
3. Resistores en paralelo para funcionar como amperímetro.
4. Baterías y resistores adecuados para uso con óhmetro.
5. Sistema de llaves selectoras para uso del circuito del óhmetro, voltímetro o amperímetro.

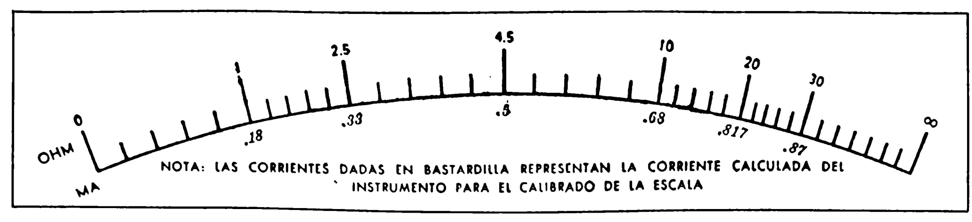


Figura 6-22. Escala baja

6. Elemento rectificador para medidas de corriente alternada, si es que se ha incluido.

En las figuras 6-25 a 6-28 se muestran las cuatro funciones esenciales de este instrumento: el amperímetro y voltímetro de corriente continua, voltímetro de corriente alternada y óhmetro.

Estas figuras se deben examinar y comparar con el esquema general de la figura 6-24, recordando los principios del manejo explicados en el texto anterior.

6-7 VOLTÍMETRO A VÁLVULA

El voltímetro a válvula o voltímetro electrónico es un instrumento muy usado en todo tipo de trabajo electrónico, ya sea en el laboratorio o en trabajos muy distintos. La información que este voltímetro puede proporcionar es la misma que se obtiene de un instrumento múltiple común (figura 6-29). Sólo se tratará aquí de su uso en general y no los detalles de su mecanismo interno.

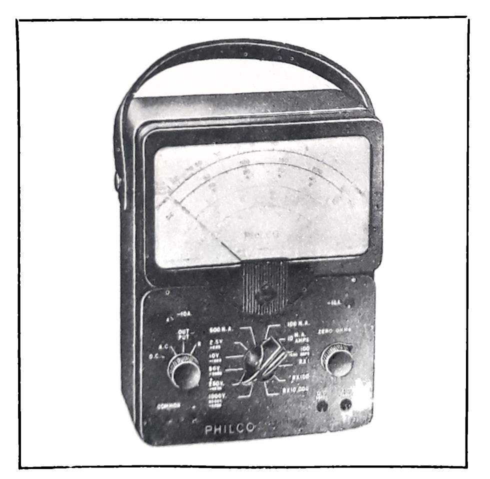


Figura 6-23. Multímetro (Tester Philco modelo 7005)

El voltímetro a válvula es un instrumento utilizado para medir tensiones de corriente alternada y continua. El modelo más común también es capaz de medir resistencia. Este instrumento utiliza una o más válvulas en un circuito especial con un mecanismo D'Arsonval. La alimentación para el funcionamiento de las válvulas se obtiene generalmente de una fuente productora de energía alimentada por la línea de corriente alternada. Para la medida de corrientes continuas y alternadas se utilizan puntas de pruebas separadas.

La ventaja principal del voltímetro a válvula sobre los instrumentos múltiples o voltímetros comunes vistos anteriormente, es su capacidad para medir tensiones sin aumentar la carga del circuito. Las condiciones normales de trabajo de un circuito, se mantienen muy cerca de lo normal, pues el voltímetro a válvula utiliza muy poca corriente. Esto es una ventaja especial en circuitos de baja alimentación donde los instrumentos convencionales de 20.000 ohm por volt pueden producir cambios en las condiciones del circuito y dar valores inexactos. La resistencia de este aparato es de alrededor de 10.000.000 de ohm; ningún voltímetro del tipo descrito anteriormente tenía tal resistencia. El voltímetro a válvula, si se emplea una punta de prueba de alta frecuencia, puede usarse para medir tensiones en corriente alternada, de una frecuencia de 20 ciclos por segundo a 10 megaciclos por segundo. La utilidad que ofrece este tipo de de voltímetro no puede obtenerse en un instrumento múltiple común. Las precauciones a observar para el cuidado y manejo de instrumentos del capítulo 3, son también aplicables al voltímetro a válvula.

6-8 INSTRUMENTOS ESPECIALES

En párrafos anteriores de este capítulo se han estudiado en detalle los instrumentos fundamentales de medida. También existen muchos tipos

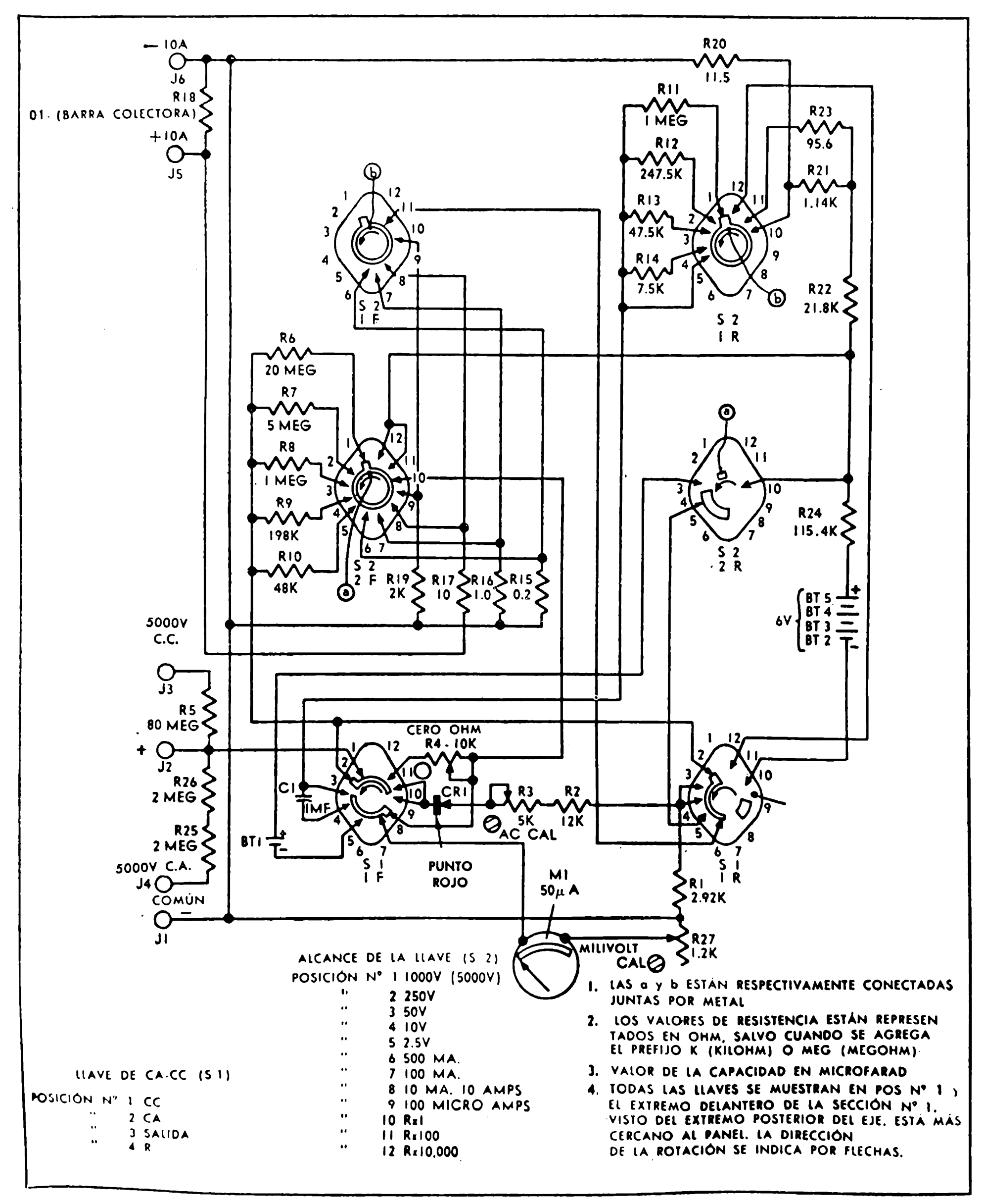


Figura 6-24. Probador Philco, modelo 7005, diagrama esquemático

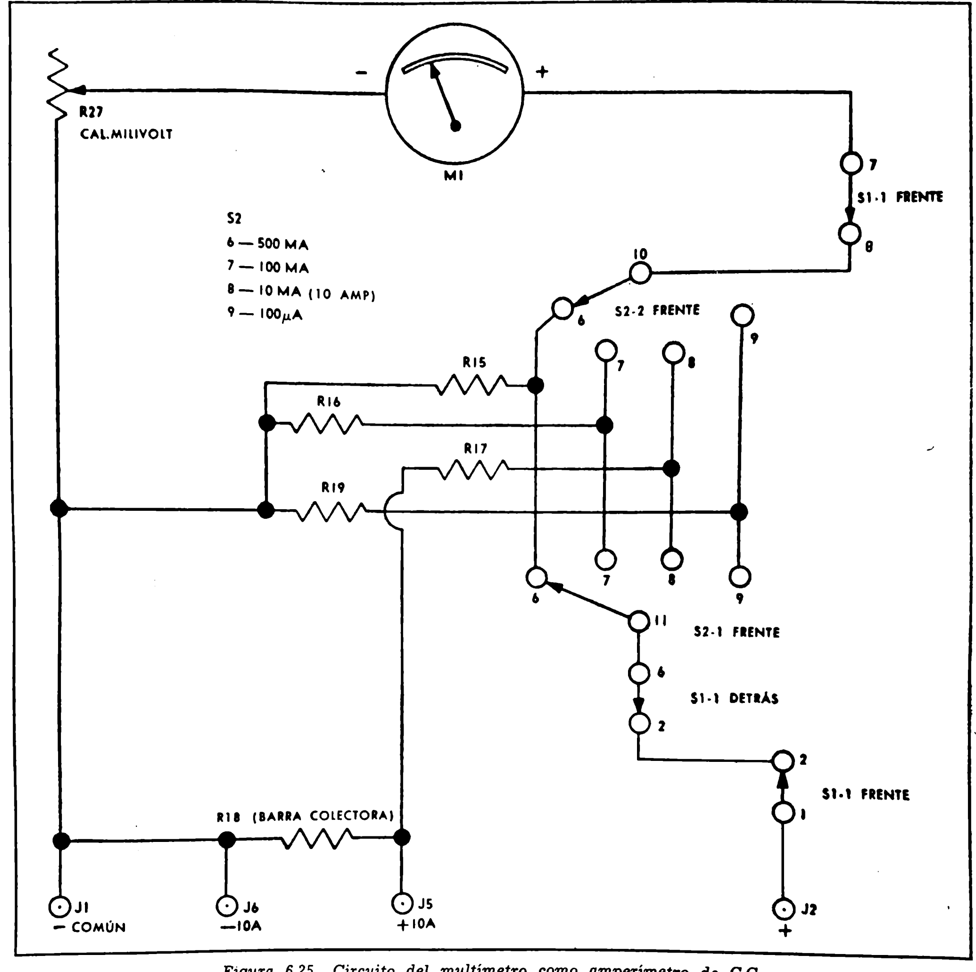


Figura 6-25. Circuito del multímetro como amperímetro de C.C.

de instrumentos especializados, siendo los más comunes los siguientes:

1. Galvanómetro
2. Megóhmetro
3. Amperímetro térmico
4. Amperímetro de termocupla
5. Probador de batería
6. Capacímetro
7. Gaussímetro
8. Wattímetro
9. Frecuencímetro
10. Decibelímetro
11. Probador de válvulas

En este capítulo se estudian varios de los instrumentos mencionados; los que no se traten ahora,

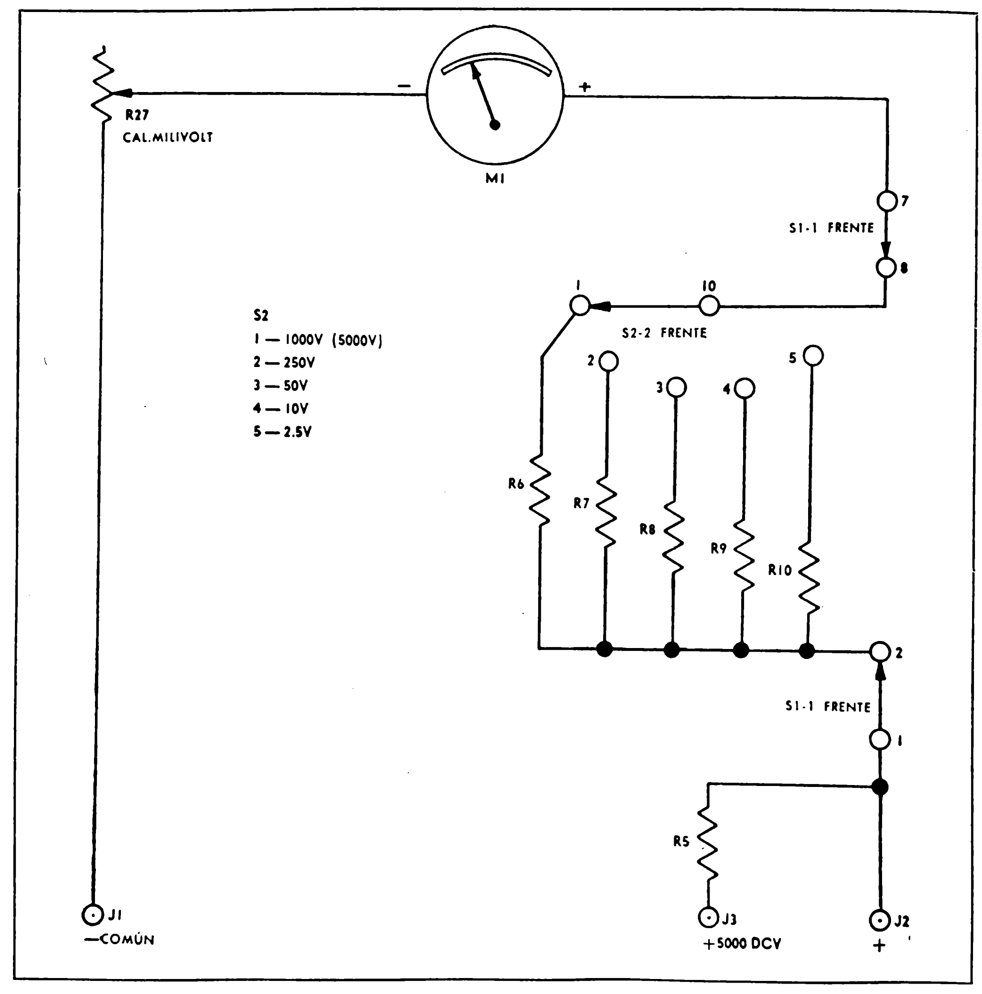


Figura 6-26. Circuito como voltímetro de corriente continua

se estudiarán a medida que lo exijan las circunstancias, en los capítulos siguientes.

Galvanómetros

El mecanismo medidor de D'Arsonval es una versión modernizada del galvanómetro D'Arsonval original. De uso común, el galvanómetro se considera como instrumento de laboratorio usado más para detectar la presencia de pequeñas corrientes eléctricas que para medirlas. En el instrumento normal de bobina móvil, el punto cero está en el extremo izquierdo de la escala. Si el cero fuera colocado en el centro de la escala, la aguja respondería a corrientes que pasan por la bobina móvil en

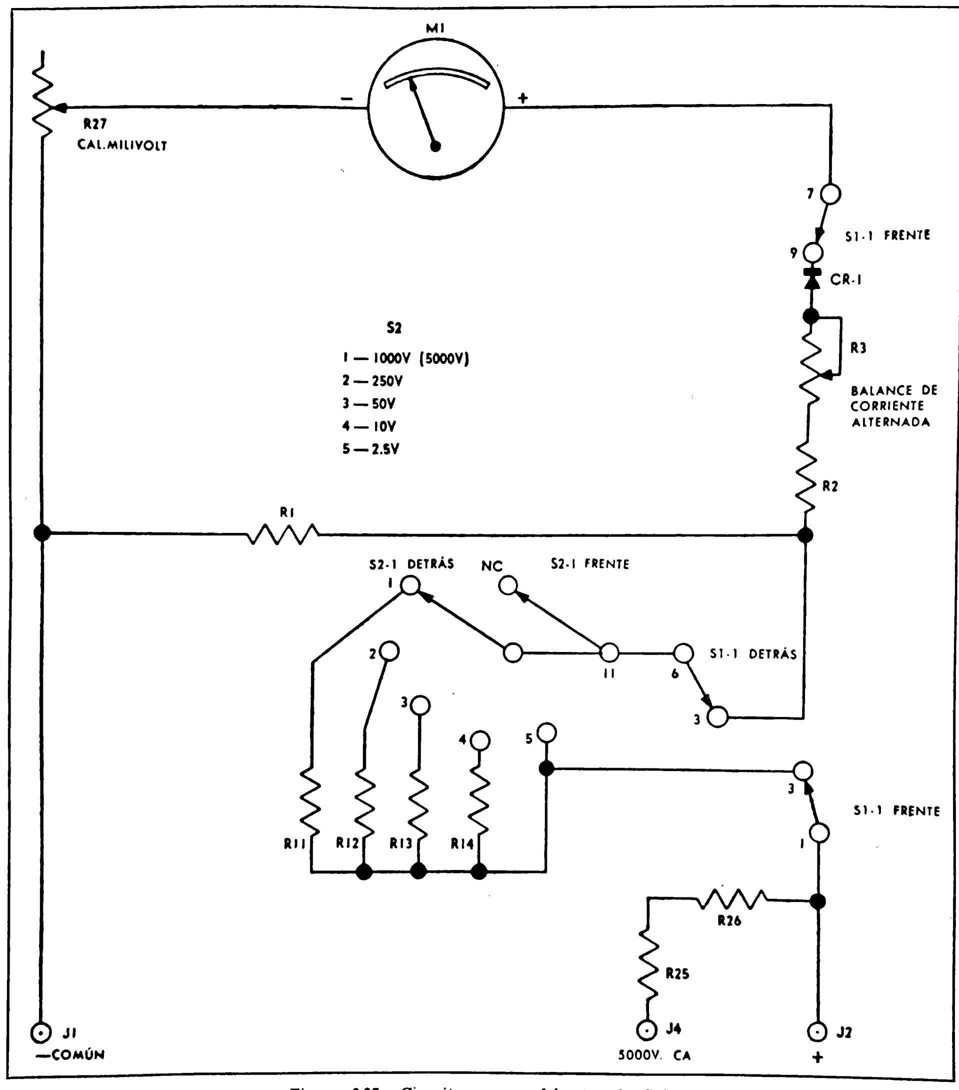


Figura 6-27. Circuito como voltímetro de C.A.

cualquier dirección; en consecuencia, se desviará hacia la derecha o hacia la izquierda. En la figura 6-30 puede verse un ejemplo de la escala de un galvanómetro de laboratorio. Nótese que la escala no tiene indicación de cantidad de electricidad, pero están las divisiones de la misma hacia la de-

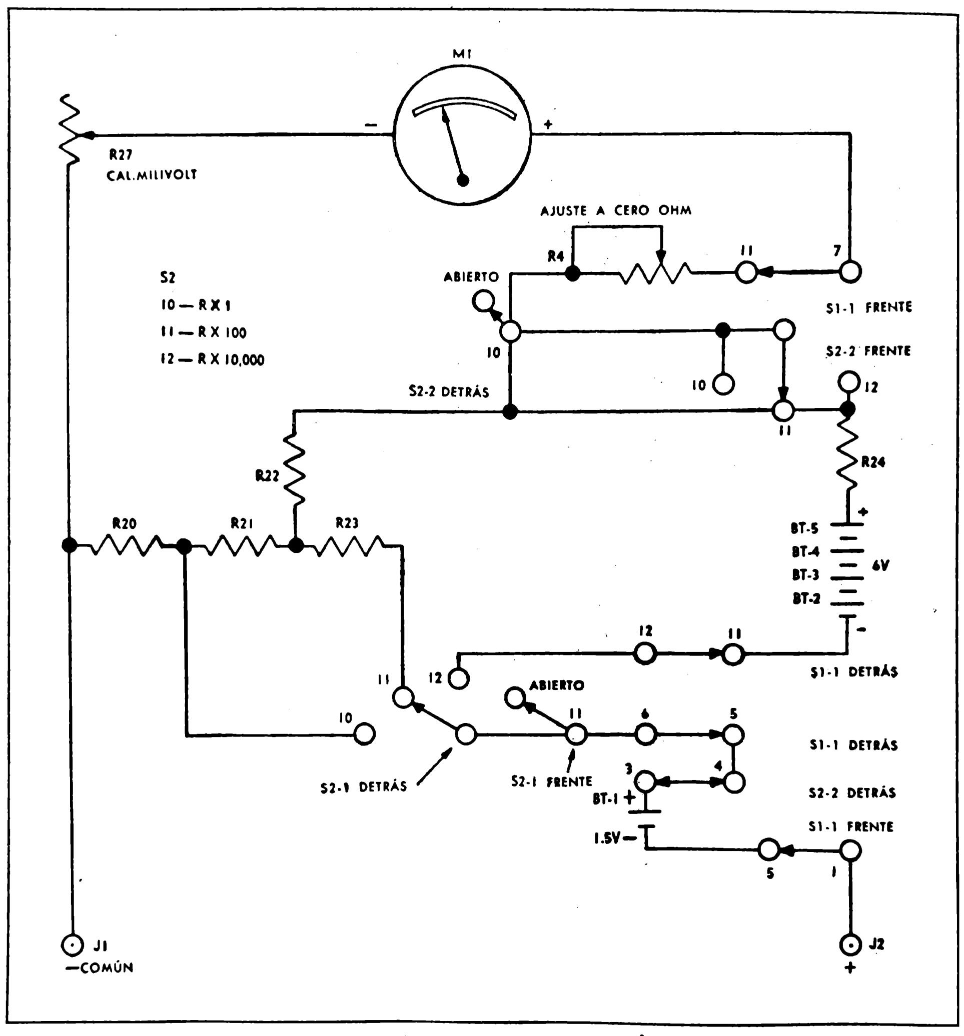


Figura 6-28. Circuito como óhmetro, en el alcance R 100

recha e izquierda del cero para indicar la dirección del flujo de la corriente. Los galvanómetros de laboratorio usan como indicador un rayo de luz reflejado sobre una escala curva de vidrio esmerilado, en lugar de una aguja, como se usa en el medidor D'Arsonval. Esto se hace para evitar el peso de la aguja y para reducir el efecto de paralaje al tomar la indicación. La figura 6-31 "A" a "E" muestra las características de un galvanómetro tipo. Obsérvese que los principios de funcionamien-

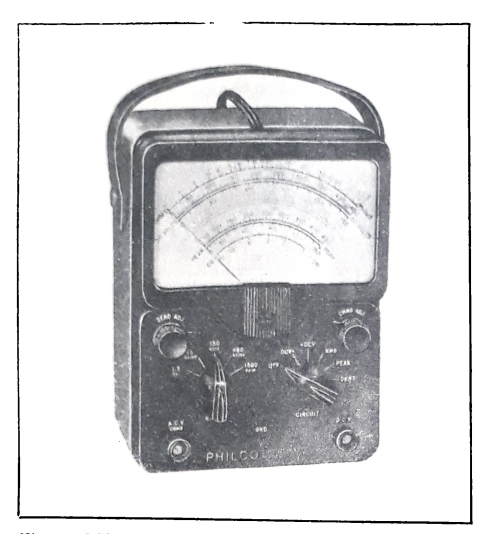


Figura 6-29. Voltímetro de válvula (V M T V) Modelo Philco 7004

to todavía dependen de la interacción de un campo magnético permanente con un campo magnético inducido.

El megóhmetro

El óhmetro común no puede medir resistencias muy altas (del orden de varios megohm), porque se necesita la alta tensión para obtener indicaciones legibles de la bobina móvil. El problema se soluciona por medio de un instrumento conocido con el nombre de megóhmetro, que puede usarse para medir resistencias de hasta 10.000 megohm.

En el megóhmetro la fuente de tensión es un generador de C.C. accionado a mano o por un motor. Generalmente, la salida del generador es de 500 volt aunque algunos lleguen a 2.500 volt. El circuito interno del megóhmetro utiliza 2 bobinas cuyos campos magnéticos resultantes producen el par de torsión que mueve la aguja indicadora. El megóhmetro es un instrumento muy útil para verificar pérdidas de corriente en conductores múltiples o cables subterráneos.

Amperímetros de termocupla

Consta de dos partes fundamentales: la termocupla y el mecanismo de la bobina móvil de corriente continua. La termocupla se basa en la propiedad de que uniendo dos metales con distinto índice de dilatación y calentando su unión, se genera una tensión entre los dos extremos.

La termocupla de la parte A de la figura 6-32 es del tipo llamado de contacto, pues la junta de la termocupla hace contacto directo con el elemento resistivo de calentamiento. Cuando pasa la corriente por el elemento de calentamiento, la temperatura del mismo aumenta. El calor, que depende del cuadrado de la corriente que fluye por el mismo, provoca el calentamiento de la termocupla a la misma temperatura. El calentamiento de la junta genera tensión electrotérmica entre los dos metales de la termocupla. Esta tensión produce una corriente que fluye a través del mecanismo de la bobina móvil de corriente continua. El mecanismo, calibrado con precisión, indicará la cantidad de corriente que fluye por el elemento calentador.

Algunas termocuplas están encerradas en tubos

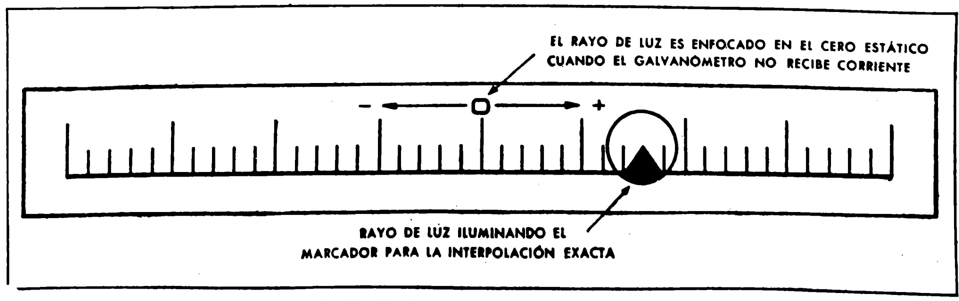


Figura 6-30. Escala de vidrio esmerilado del galvanómetro

al vacío (parte C de la figura 6-32) para poder funcionar a temperaturas más altas, y también para aislar el elemento del aire circundante. Las termocuplas autocalentadas (parte D) y de tipo puente (parte E) son variaciones del tipo fundamental de contacto. La mayor aplicación de los instrumentos del tipo de termocupla es medir corrientes de radiofrecuencia (corrientes alternas de alta frecuencia), en los equipos de transmisión.

6-9 RESUMEN

En el tema instrumentos se ha estudiado el funcionamiento de los instrumentos fundamentales, utilizados para detectar y medir la cantidad de corriente, tensión y resistencia presentes en un circuito eléctrico. En el capítulo 3, Uso de aparatos de medición, se puntualizaron las precauciones que deben observarse durante el uso de dichos aparatos. Estas precauciones deben ser siempre recordadas y observadas.

El mecanismo que más se emplea hoy en la fabricación de instrumentos es el mecanismo de bobina móvil o de D'Arsonval. Funciona en base al principio electromagnético que establece que la repulsión entre dos fuerzas magnéticas es directamente proporcional al flujo de corriente a través del electroimán. Este tipo de indicador puede ser hecho para acusar una desviación máxima, al pasar corrientes muy débiles a través de la bobina móvil. Este mecanismo elemental puede usarse para indicar varios valores máximos de corriente, colocando un resistor en paralelo o entre los terminales del medidor. Puede también usarse para medir la tensión existente entre dos puntos, cuando se coloca una resistencia multiplicadora en el circuito medidor. La resistencia multiplicadora limitará la corriente a través del medidor cuando se imprima una tensión determinada a través del mecanismo medidor y la resistencia multiplicadora. El mecanismo de bobina móvil puede conectarse en un circuito medidor con una batería y resistencias de valor conocido para dar en una escala el valor de la resistencia no conocida, que se ha conectado en serie o en paralelo con el circuito del medidor. El óhmetro tipo serie se usa para medir resistencias desconocidas en alcances alto, medio y bajo. La escala provista para este tipo de indicadores no es lineal, y tiene la indicación *cero ohm* (corto) en el tope de la escala. El óhmetro tipo paralelo se usa específicamente para la medición de valores de resistencia muy bajos, del orden de 0 a 30 ohm. Se utilizan también otros tipos de mecanismos medidores, pero no son de uso tan común como la bobina móvil. Ésta puede aplicar-

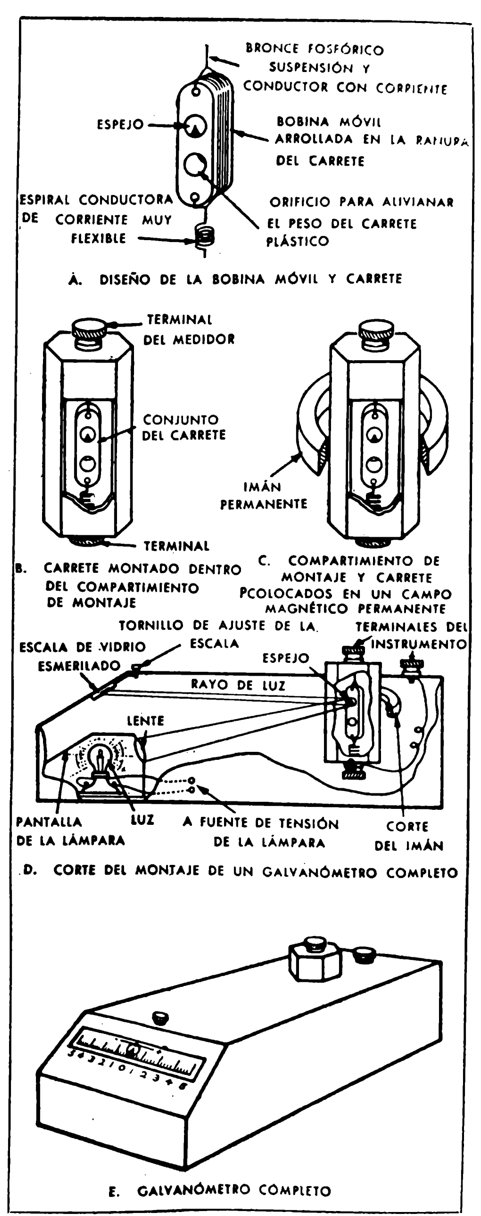


Figura 6-31. Galvanómetro de haz luminoso.

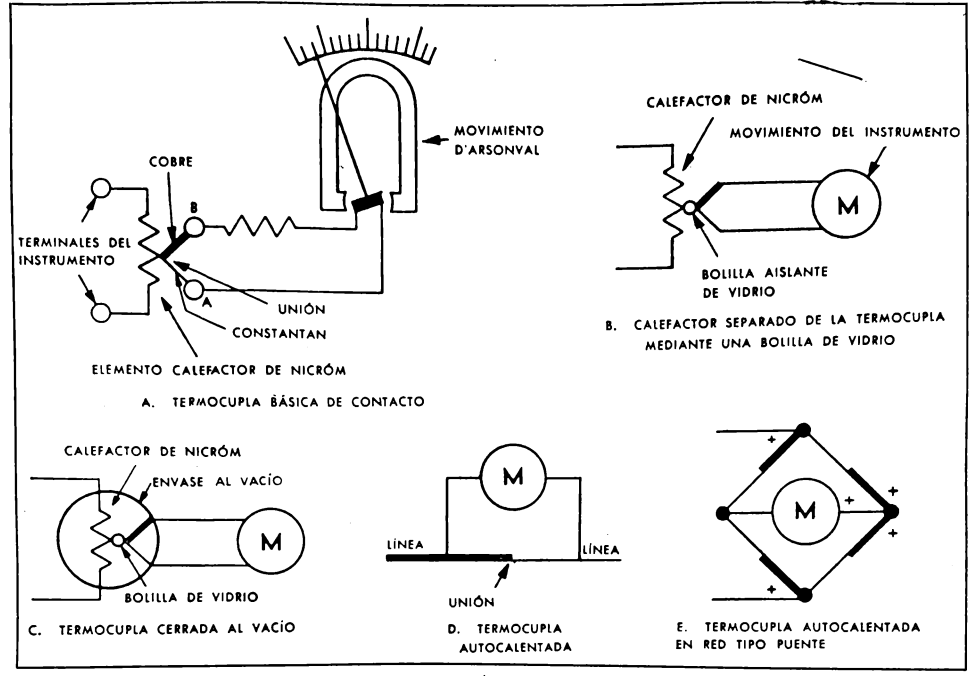


Figura 6-32. Varios tipos de construcción de termocuplas

se en muchos otros tipos de instrumentos, como ser en medición de capacidad, de características de válvulas, de cantidad de flujo magnético, y con muchos otros fines similares. La teoría de los medidores es una parte muy importante del campo de la electrónica, puesto que tienen muchísimas aplicaciones para la determinación de las magnitudes eléctricas.

CUESTIONARIO

1. ¿Cuál es la función de los resortes en un mecanismo de D'Arsonval?
2. ¿Cuál es el principio fundamental del funcionamiento del mecanismo dinamómetro?
3. ¿Cómo puede ser amortiguado un mecanismo móvil?
4. Defina la *sensibilidad de un mecanismo móvil.*
5. Explique brevemente la finalidad de la resistencia en paralelo de un amperímetro.
6. Un amperímetro con más de una resistencia en paralelo se llama ....
7. Dado un medidor de dos miliampere, con una resistencia interna de 45 ohm, ¿cuál es el valor de la resistencia en paralelo requerida para extender el alcance de medición hasta 10 miliampere?
8. Cuando un amperímetro mide un paso de corriente, ¿se conecta en serie o en paralelo?

9. Explique brevemente el significado de "carga de un amperímetro".

10. Un mecanismo móvil de D'Arsonval se puede usar para medir corrientes alternadas, cuando se emplea en conjunción con un ....

11. ¿Cuál es la diferencia fundamental entre el circuito de un amperímetro y el de un voltímetro?

12. ¿Cuál es la finalidad de una resistencia multiplicadora en un medidor?

13. Dado un medidor de 2 miliampere con una resistencia interna de 45 ohm, ¿cuál es el valor de la resistencia multiplicadora requerida para una indicación máxima de 100 volt?

14. Defina el grado de sensibilidad de un voltímetro.

15. ¿Cuál es el grado de sensibilidad de un voltímetro que utiliza un mecanismo móvil de un miliampere?

16. Explique brevemente el significado de "efectos de carga de un voltímetro".

17. ¿Qué es lo primordial que requiere un voltímetro para reducir los efectos de carga?

18. Cuando se efectúan mediciones de tensión de C.C., ¿cuál es la precaución más importante que se debe observar?

19. Explique brevemente la diferencia entre los circuitos de un óhmetro serie y de un óhmetro paralelo.

20. ¿Cuál es la diferencia entre las escalas de un óhmetro en serie y un óhmetro en paralelo?

21. ¿Qué precaución fundamental se debe observar al efectuar mediciones de resistencia con un óhmetro en un circuito electrónico?

22. ¿Cuál es la principal ventaja de un voltímetro a válvula, comparándolo con otro tipo de voltímetro?

23. El mecanismo medidor de D'Arsonval es una versión moderna de ....

24. La finalidad de un megóhmetro es medir ....

25. Cuando una termocupla se coloca dentro de un tubo en el que se ha hecho el vacío, ¿aumenta o disminuye su sensibilidad?

CAPITULO VII

Baterías

7-1 Introducción

La pila química fue la primera fuente útil de fuerza electromotriz (f.e.m.). La producción de una f.e.m. por medios químicos se obtuvo gracias a los esfuerzos de dos científicos italianos: Luigi Galvani, que descubrió primero el proceso, y Alejandro Volta que construyó la primera pila.

La pila voltaica ha sido mejorada hasta que se ha llegado a obtener la eficiente pila utilizada hoy, para conseguir tensiones para el funcionamiento de aparatos que abarcan desde el diminuto audífono hasta los grandes faroles de emergencia.

Otro tipo de pila química es la pila secundaria, llamada acumulador. Tiene la propiedad de permitir su uso durante largo tiempo, si se renueva su energía química a intervalos específicos. Un ejemplo típico de esta pila es la utilizada en automóviles (de 6 ó 12 volt).

Las pilas fueron en un tiempo la principal fuente de energía para el funcionamiento de radios y otros artefactos eléctricos. Sin embargo, debido a las necesidades crecientes de suministro de energía eléctrica, el generador suple ahora la demanda de electricidad para uso cotidiano y la pila todavía es muy apreciada como fuente de energía en casos de urgencia y en aparatos electrónicos portátiles de uso civil y militar.

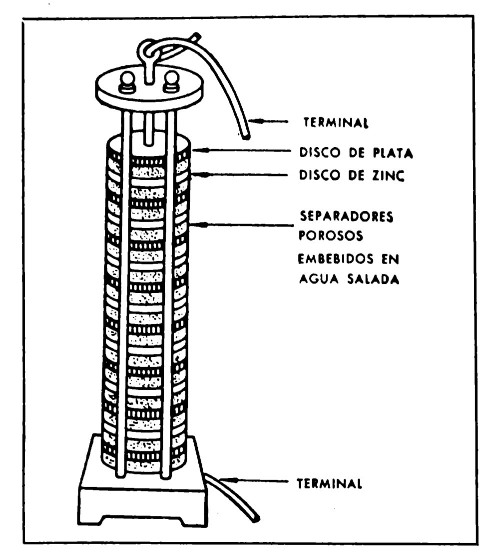


Figura 7-1. Pila de Volta

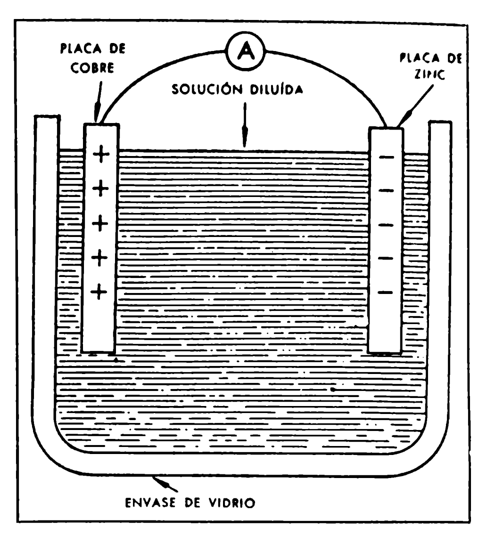


Figura 7-2. Pila voltaica

7-2 LA PILA ELEMENTAL

Se clasifica como *pila elemental* a todo tipo de aparato en el que tiene lugar un cambio químico permanente para producir fuerza electromotriz. Generalmente, una de las partes componentes de la pila se consume gradualmente durante el uso, y no puede restaurarse invirtiendo la actividad química como ocurre en los acumuladores.

Pila Voltaica o Par Voltaico

La pila voltaica, que fue la primera pila elemental, consiste en un eje de material aislante en el cual se colocan en forma alternada discos de plata y zinc, cada uno separado del otro con arandelas de fieltro enbebidas con una solución de sal, como se ilustra en la figura 7-1. Volta, más tarde, perfeccionó una pila más eficiente, colocando en un recipiente de vidrio una placa de cobre y otra de zinc en una solución de lejía. Volta encontró que cuando se conectaba un alambre a través de las placas de zinc y cobre en esta solución, se producía un flujo de corriente a través del mismo. Esta pila fue denominada entonces pila voltaica y se la ilustra en la figura 7-2.

Acción química

Las dos placas de metales distintos de la pila voltaica se llaman *electrodos*. La solución líquida en que se sumergen los electrodos se llama *electrólito* y puede ser un ácido, álcali o sal disuelta en agua, dependiendo ello de los materiales usados como electrodos. El propósito del electrólito es actuar químicamente sobre los dos electrodos y crear entre los mismos una diferencia de potencial.

Cuando se mezcla un ácido o una sal con agua para formar la solución electrolítica, ocurren dos procesos: primero, el ácido o la sal se disuelven en el agua; y, segundo, ocurre una reacción química llamada *ionización*.

Para definir la ionización se dice que cuando una sustancia química se ioniza, sus átomos se parten parcialmente en partículas que tienen cargas eléctricas; las partículas se llaman *iones*.

Un ion es un átomo de carga positiva o negativa. Cuando un átomo tiene su complemento normal de electrones que giran en sus órbitas alrededor del núcleo, es neutro. Si el átomo tiene un exceso de electrones tendrá carga negativa y será un *ion negativo;* si tiene una falta de electrones tendrá carga positiva y será un *ion positivo*.

Cuando se coloca ácido sulfúrico con agua para formar un electrólito, se produce la ionización. La molécula de ácido sulfúrico se parte en tres iones: dos iones de hidrógeno H^+ H^+ y uno de sulfato SO_4^{--}. Los iones de hidrógeno poseen carga positiva mientras que el ion sulfato posee dos cargas negativas. Cuando se cumple la condición

de que el número de iones positivos sea igual al número de iones negativos, se dice que existe un estado de equilibrio iónico, según se ve en la figura 7-3 A. Al sumergir un electrodo de zinc en la solución de electrólito, se produce otra reacción química, como se observa en la parte B de la figura. El ácido disuelve algo de zinc produciendo iones de zinc positivamente cargados Zn++. Cada ion de Zn producido de esta forma, deja dos electrones libres en el electrodo de Zn. A medida que la acción continúa gradualmente, el electrodo de Zn se carga negativamente. En forma parecida, el electrólito se cargará positivamente. Los iones positivos de la solución se ubicarán en toda la zona adyacente al electrodo cargado negativamente.

Cuando se coloca en la solución un electrodo de cobre, se produce otra reacción química que ocurre según se observa en la figura 7-3 C. Los iones positivos de hidrógeno de la solución son atraídos hacia el electrodo de cobre, donde cada uno recibe un electrón de un átomo de cobre. Cada ion positivo, después de recibir un electrón, se transforma en un átomo de hidrógeno. Estos átomos se reunen y abandonan la solución, en forma de burbujas de hidrógeno. La pérdida de los electrones del electrodo de cobre hace que éste se cargue positivamente. Así, con un electrólito ácido que actúa sobre dos electrodos distintos, se obtendrá por acción química una diferencia de potencial entre los mismos.

Flujo de corriente en la pila primaria

Si los dos electrodos están conectados exteriormente mediante un conductor, se produce un flujo de electrones desde el electrodo negativo (zinc) hacia el positivo (cobre). Cuando los electrones abandonan el electrodo negativo, el electrólito forma más iones de zinc, reponiendo así los electrones sobre el electrodo de zinc. En el electrodo positivo los iones hidrógenos se unen con los electrones que llegan del electrodo de zinc a través del conductor, y al unirse se transforman en moléculas de gas hidrógeno que se desprenden en forma de burbujas. Aunque el flujo de corriente en el circuito externo consiste en un flujo de electrones desde el polo negativo hacia el polo positivo, el flujo de la corriente del electrólito consiste en un pasaje de iones desde el polo positivo hacia el negativo. Los iones positivos y los electrones negativos se unen en la superficie del electrodo de cobre, y forman átomos neutros de gas hidrógeno. El resultado de esta acción es que la carga de cada electrodo se mantiene casi constante, y la diferencia de potencial entre ambos, es siempre la

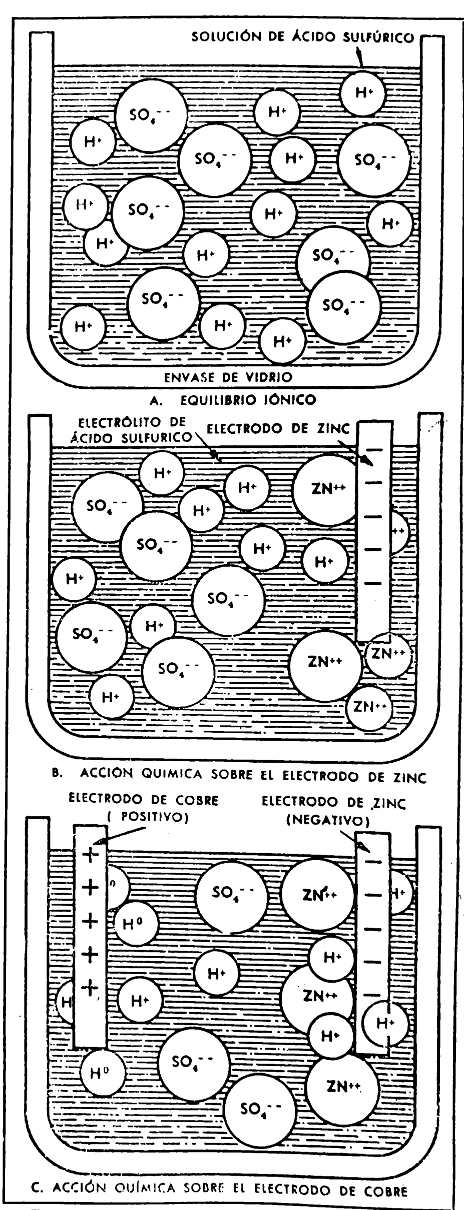


Figura 7-3. Acción sobre electrólito y electrodos

misma. Si los electrodos permanecen conectados mediante un conductor, la corriente continuará fluyendo hasta que todo el zinc se haya reducido a iones. En ese instante la corriente cesa.

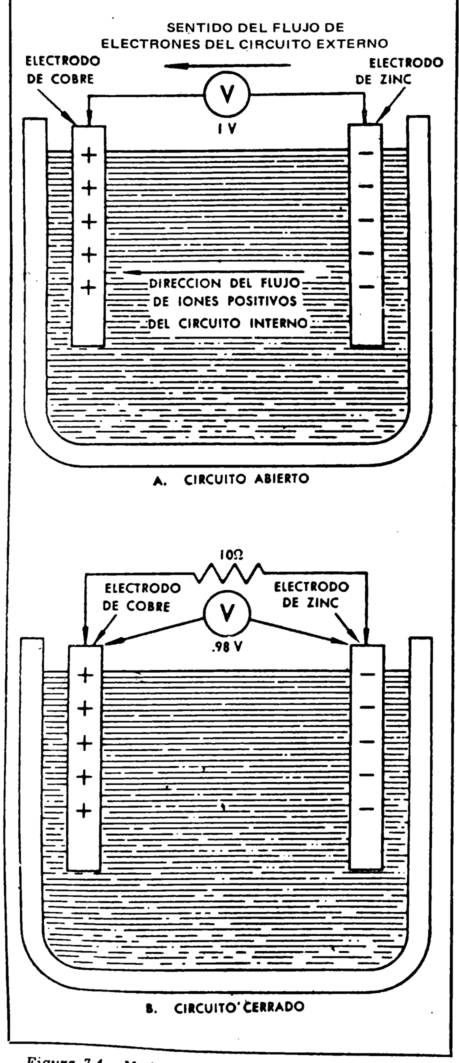


Figura 7-4. Medición de tensión en la pila primaria

Acción local

Un efecto que disminuye la vida útil de la pila es la acción local. Se produce debido a las pequeñas cantidades de impurezas que se acumulan en el electrodo de zinc. Salvo que el zinc sea químicamente puro, generalmente tendrá pequeñas partículas de carbón o hierro adheridas al mismo. Estas impurezas entran en una reacción químicamente separada con el electrólito y provocan pequeñas corrientes eléctricas dentro del Zinc, consumiendo el electrodo, no obstante estar abierto el circuito exterior (pila desconectada). Para prevenir la acción local se puede usar un electrodo de Zinc puro, o se lo puede recubrir de mercurio. El zinc se mezcla con el mercurio, pero las impurezas son cubiertas por el mismo, de manera que no pueden iniciar reacción con el electrólito.

Resistencia interna

Así como el conductor de cobre presenta resistencia al flujo de electrones, la solución electrolítica presenta también alguna resistencia al movimiento de los iones. Para que se muevan los iones dentro de la pila, se consume parte de la tensión generada por la misma. Esta tensión interna requerida debe substraerse del total de fuerza electromotriz de la pila, lo que produce una tensión terminal reducida cuando la corriente fluye por el circuito externo. Esto es similar a la acción de la resistencia de un flujo electrónico y se dice que la pila tiene resistencia interna.

Para determinar la resistencia interna de una pila se deben obtener dos datos de tensión: a circuito abierto y a circuito cerrado. La medición del circuito abierto se realiza conectando un voltímetro de alta resistencia a los electrodos de la pila, como se muestra en la parte A de la figura 7-4. La tensión a circuito cerrado se toma aplicando una carga de baja resistencia a los electrodos, como se ilustra en la parte B de la figura. Los resultados de estas mediciones indican una diferencia de 0,02 volt entre la tensión a circuito abierto y cerrado (sin carga y con carga). Debe ser atribuida a un aumento de resistencia del circuito, debido a la resistencia interna de la batería o pila. La simple aplicación de la ley de Ohm dará el valor verdadero de la resistencia interna de la batería.

Es necesario hallar la corriente (I_c) del circuito bajo carga:

$$I_c = \frac{E_{\text{circuito cerrado}}}{R_{\text{resistencia carga}}} \qquad (7\text{-}1)$$

$$= \frac{0{,}98}{10}$$

$$I_c = 0{,}098 \text{ ampere}$$

Puede hallarse la resistencia interna (R_{int}), usando la corriente calculada y la diferencia medida entre la tensión a circuito abierto y la misma a circuito cerrado ($E_{caída}$).

$$R_{int} = \frac{E_{(caída)}}{I_c} \qquad (7\text{-}2)$$

$$= \frac{0{,}02}{0{,}098}$$

$$R_{int} = 0{,}204 \text{ ohm}$$

A medida que se utiliza la pila primaria, su acción química disminuye en intensidad; la resistencia interna de la batería aumenta hasta que ésta no produce más la cantidad de corriente para la cual fue diseñada.

Polarización

Cuando una pila primarià se polariza, la tensión del circuito externo cae rápidamente. Esto se debe a una capa de burbujas de hidrógeno que se deposita sobre el electrodo de cobre. Las burbujas citadas reducen la superficie libre del electrodo, y atraen iones de hidrógeno. Este conjunto de cargas positivas repele cualquier otra carga del mismo signo que pueda hallarse en las inmediaciones del electrodo de cobre. Debido a esto, la resistencia interna de la pila aumenta, disminuyendo la f. e. m. Los efectos de la polarización son tales, que la vida de la pila ha concluido.

Para contrarrestar los efectos adversos de la polarización e incrementar, por lo tanto, la vida útil de la pila, se agrega bióxido de manganeso al electrólito. El bióxido de manganeso es un agente oxidante que se combina con las burbujas de hidrógeno del electrodo de cobre y produce agua que se incorpora al electrólito.

Pilas secas

La pila elemental que se usa más extensamente es la pila seca común o pila de Le Clanché. La construcción de la pila seca se puede ver en la figura 7-5. El envase de zinc tiene un doble propósito: contener el agente despolarizante y el electrólito, y actuar como electrodo negativo de la pila. El terminal positivo es una barra de carbón con un sombrerete metálico, para establecer contacto, colocado en el centro de la pila. El electrólito que generalmente se usa es una pasta concentrada de cloruro de amonio y almidón de maíz. Cuando se construye la pila, el electrólito químico se disocia en iones de amonio positivos e iones cloruro negativos. Cuando el zinc toma contacto con el electrólito, los iones de zinc positivos entran a la pasta electrolítica e impulsan o repelen los iones hidrógeno y amonio positivos hacia el electrodo de carbón positivo. Esta reacción produce las cargas positivas y negativas de los electrodos, necesarias para crear la f.e.m. entre los electrodos. Cuando un circuito exterior se conecta entre los terminales, la corriente fluye por el circuito externo del electrodo de zinc al de carbón. Asimismo, los iones de zinc se mueven del electrodo de zinc al de carbón. Esta acción ocurre en toda pila elemental y uno de los electrodos siempre se descompone. Puesto que el electrodo que se descom-

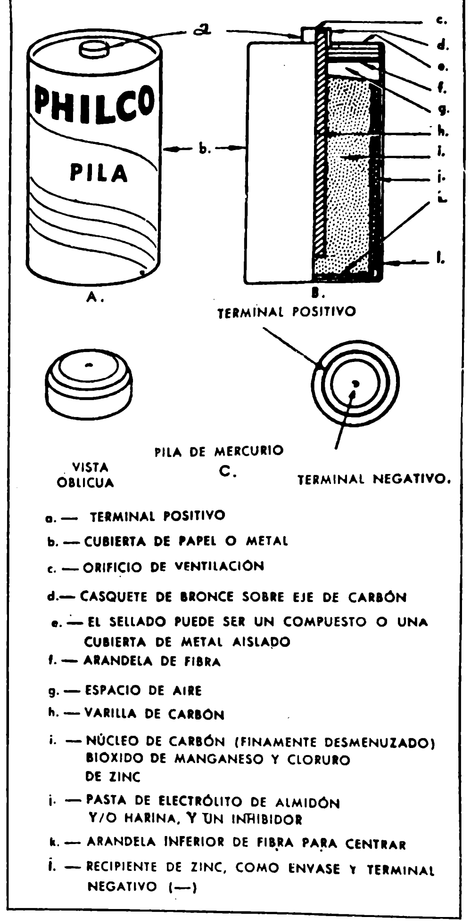


Figura 7-5. Vista de conjunto y sección de una pila seca común

pone en la pila seca común forma el envase exterior, las pilas viejas se romperán derramando electrólito y dañando el equipo.

También hay otras formas de pilas elementales construidas para satisfacer necesidades particulares. Un ejemplo es la pila de cloruro de plata y magnesio, que se activa sumergiéndola en agua pura o salina. Estas pilas se usan principalmente en casos de emergencia en barcos o aviones que caen en el mar.

Baterías de mercurio

La batería de mercurio, muy usada en audífonos y radios portátiles, es parecida a las pilas de carbón en su forma estructural (ver fig. 7-5 A), pero difiere radicalmente en su composición química y en su capacidad de corriente para un volumen determinado. Asimismo, la batería de mercurio es generalmente más pequeña y tiene un formato como se ilustra en la parte C de la figura. Se usa también el envase de zinc como en la pila de carbón y zinc. El eje central, en lugar de ser carbón puro, es una mezcla de carbón y óxido de mercurio. El electrólito es una pasta cuyo ingrediente activo es un álcali fuerte, hidróxido de potasio, el cual en una forma menos pura se llama potasa cáustica. Como consecuencia del electrólito radicalmente distinto, y el uso de un compuesto de mercurio en la barra central, la polaridad de la pila de mercurio es inversa a la de la pila de carbón-zinc. En otras palabras, el envase de la pila es el terminal positivo, y el contacto central es el negativo. La tensión producida es de 1,34 volt por pila, cantidad levemente menor a la de la pila carbón-zinc. Igualmente, la pila de mercurio es capaz de producir pequeñas corrientes por un tiempo mucho más largo que la de carbón-zinc del mismo tamaño, y una pila de mercurio de tamaño mucho menor tendría la misma duración que una de carbón-zinc de tamaño mayor.

Esta es la razón de su uso generalizado en audífonos y radios portátiles.

Tensión y corriente de la pila seca

La magnitud de la corriente o del potencial creado por una pila seca depende de dos factores: los materiales usados para los electrodos y la solución utilizada como electrólito. La pila común produce una f.e.m. de aproximadamente 1,5 volt. El tamaño de los electrodos y la cantidad de electrólito no afecta la tensión de la pila, pero sí la intensidad de su corriente. Las pilas secas de mayor tamaño son capaces de producir mayores intensidades de corriente que las pilas más pequeñas, tal como el tipo usado en linternas.

Cuando se fabrica una pila seca, tiene una duración en depósito de aproximadamente un año. El depósito es el tiempo que durará o mantendrá su carga sin usar. Durante los primeros meses de vida de una pila seca, la acción local dentro de la misma es muy pequeña. Una pila nueva suministrará tensiones muy parecidas en circuito abierto o cerrado. Luego de unos meses, la acción local se hace más fuerte y, en consecuencia, aumentará la resistencia interna. Esto continúa hasta que la pila se inutiliza. Luego que ha estado un período largo en depósito, una pila que acusaba una tensión a circuito cerrado de 1,5 volt, puede tener un volt o menos.

Esta caída de tensión muestra que la resistencia interna de la batería ha aumentado debido a la acción local.

Terminales de la pila y ensayo

Generalmente, los terminales de una pila seca no tienen marcas que identifiquen su polaridad. Esto es debido a la facilidad de reconocer la diferencia en los terminales. Para la mayoría de las pilas, el terminal central es positivo, y el externo negativo. Por lo tanto, cuando un grupo se conecta en serie y luego se coloca en un recipiente con dos terminales, los mismos se marcan generalmente por medio de signos negativos o positivos, o usando un cable rojo para el polo positivo y uno negro para el negativo. Estos tipos de marcación se pueden encontrar en las grandes pilas secas usadas en radios portátiles o lámparas portátiles de alta potencia.

Antes de colocar una batería en un equipo, se la debe probar para determinar si puede o no producir la tensión requerida bajo carga. Hay dos métodos de efectuar esta prueba adecuadamente; un método es colocar la batería en equipo y verificar la tensión de los terminales bajo carga. Cuando la batería no puede probarse en el equipo por una u otra razón, se puede construir y utilizar un probador especial de batería. El probador está compuesto simplemente por una carga resistiva normalizada, en paralelo con un voltímetro. Este último indicará la f. e. m. existente bajo condiciones de carga.

Clasificación de las pilas secas

La clasificación de las pilas secas se hace según su aplicación. Se clasifican en:

Pilas "A", utilizadas para el suministro de corrientes altas y tensiones bajas, y se usan generalmente en flashes electrónicos y radios portátiles.

Pilas "B", se usan en radios portátiles juntamente con baterías "A" y a determinadas partes de las

válvulas suministran altas tensiones (22,5; 45; 90, etcétera).

Pilas "C", que se utilizan también en equipos portátiles de radio, para alimentar bajas corrientes o tensiones intermedias a ciertas partes de las válvulas.

El block o grupo de pilas es un montaje que contiene dos o más clases de pilas. El block más común contiene una batería "A" y una "B".

7-3 COMBINACIÓN DE BATERÍAS

Frecuentemente, un circuito electrónico requiere una tensión o corriente que una sola pila no puede suministrar; para suplir esta necesidad se utilizan grupos de pilas en disposiciones variadas en serie y en paralelo.

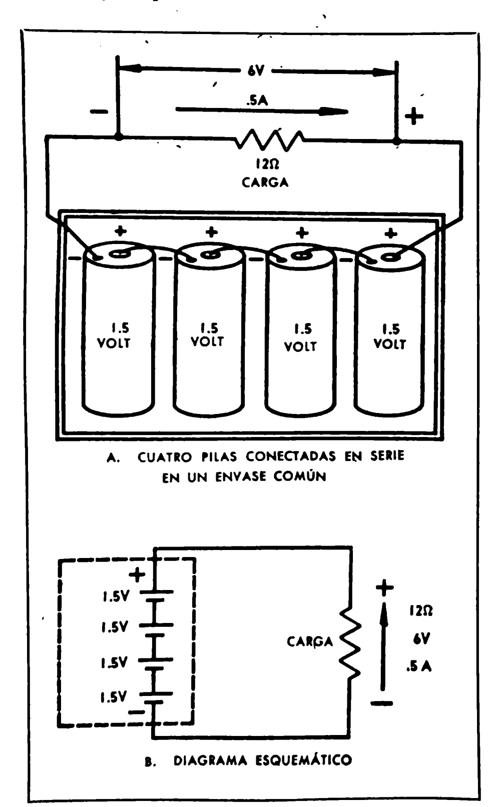


Figura 7-6. Método para conectar cuatro pilas de 1,5 y 0,5 ampere para formar una batería de seis volt y 0,5 ampere

Conexión en serie

Recordemos que las leyes de los circuitos en serie son: la intensidad de corriente en un circuito en serie es la misma en todas las partes del circuito; la suma de las caídas de tensión individuales es igual a la tensión de la fuente. Si se observa la figura 7-6, cuatro pilas primarias están conectadas de tal manera que la tensión aplicada a la carga es igual a la suma de las tensiones de cada una de las pilas; y la intensidad de corriente será para el conjunto la misma de una sola pila. En consecuencia, la carga de 12 ohm permite en el circuito una circulación de 0,5 ampere para una tensión de 6 volt. Si se usan pilas de distinta capacidad de suministro de corriente (distinto tamaño), la corriente disponible se determina según la pila más pequeña.

Conexión en paralelo

Cuando se conectan baterías en paralelo, como se puede observar en la figura 7-7, éstas se ajustan a las leyes de circuito paralelo. Al conectar cuatro baterías de 1,5 volt y 0,5 ampere en paralelo, la carga podría absorber 0,5 ampere de cada pila, de lo cual resultaría un total de dos ampere de intensidad suministrados por el conjunto. Esta combinación de baterías podría entonces ser capaz de suministrar cuatro veces más intensidad que una sola pila, con lo que podría esperarse una duración cuatro veces superior. Puesto que la tensión que actúa sobre un circuito paralelo es igual a la que actúa sobre una de sus ramas, la tensión de salida en este circuito es 1,5 volt, es decir la misma de cada una de las pilas.

Para montaje de baterías en paralelo, cada rama debe tener baterías o pilas que suministren la misma tensión que las demás ramas. Toda vez que sea necesaria una corriente elevada a baja tensión se usan las baterías conectadas en paralelo. Si se desea que un equipo funcione durante un período de tiempo mayor que el normal para una sola pila, pueden usarse dos pilas en paralelo aumentando así la capacidad de corriente y, en consecuencia, el tiempo de uso.

Conexiones en serie - paralelo

Si la corriente y tensión que exige un equipo excede la salida de una sola batería, se pueden utilizar varias baterías conectadas en forma mixta, es decir en serie-paralelo para alcanzar los valores requeridos. Por ejemplo, un circuito requiere 90 volt y 4 ampere. Se conectan dos baterías de 45 volt 2 ampere en serie; se obtiene una batería de 90 volt y 2 ampere. Así se alcanza la tensión requerida pero no la corriente necesaria. Si se co-

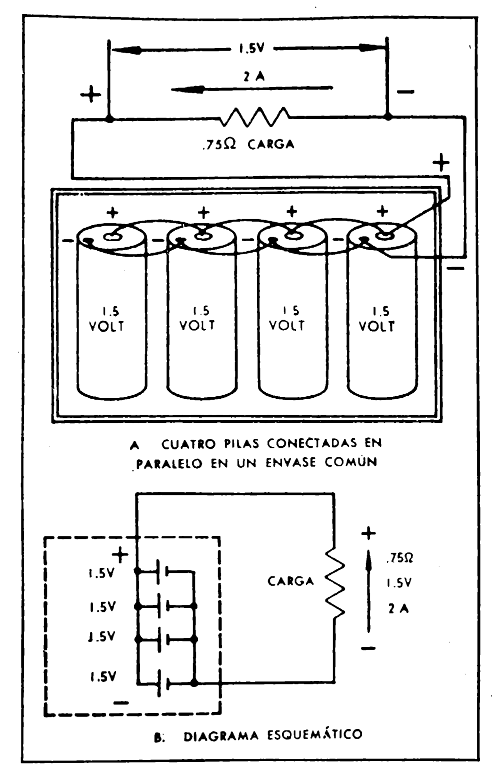


Figura 7-7. *Método para conectar cuatro pilas de 1,5 volt y 0,5 ampere para formar una de 1,5 volt y 2 ampere*

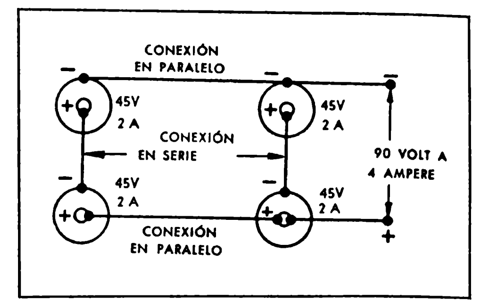


Figura 7-8. *Método para conectar cuatro pilas de 45 volt, 2 ampere para obtener una batería de 90 volt, 4 ampere*

nectan las dos pilas en paralelo se obtienen los 4 ampere, pero sólo 45 volt; en consecuencia, sólo conectando 2 pares de baterías en *serie-paralelo* se obtiene la corriente y tensión requeridas. Las conexiones de los terminales para este circuito se ilustran en la figura 7-8.

7-4 PILAS SECUNDARIAS

La pila secundaria, como la elemental o primaria, produce energía eléctrica como consecuencia de la transformación de energía química. Sin embargo, la composición química de los elementos usados en la pila secundaria se alteran durante la transformación, pero los materiales no se consumen físicamente. Cuando la estructura química de los materiales usados en una pila secundaria cambian por completo durante el proceso de descarga, la producción de f.e.m. desaparece. La ventaja de la pila secundaria es que las propiedades originales de los materiales pueden restaurarse para que la batería pueda producir nuevamente una f.e.m. comparable a una pila nueva.

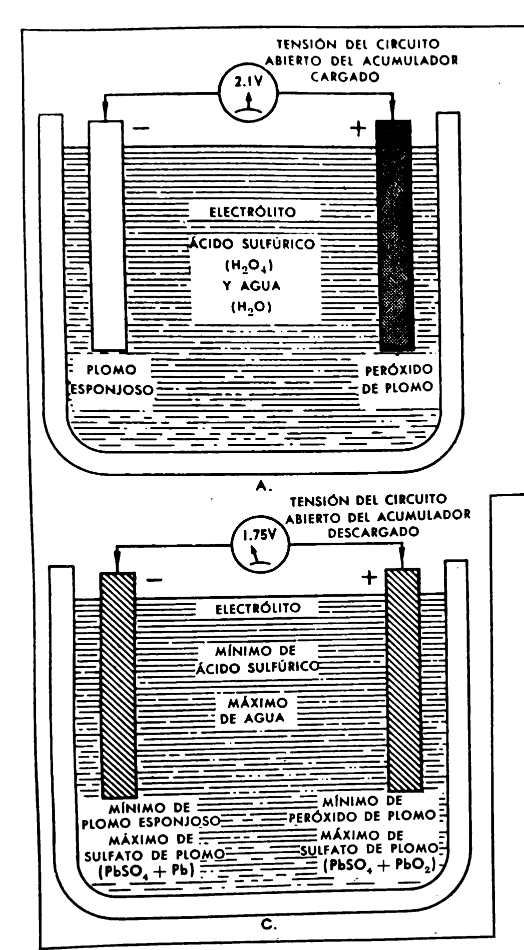
La pila secundaria más común en uso es la de plomo y ácido, que se utiliza para hacer arrancar motores de gasolina de automóviles, aviones y barcos. Este tipo de pila recibe el nombre de *acumulador*.

Acción química

En la figura 7-9 se muestra una pila típica secundaria cargada. Como se observa en la figura, los electrodos son de plomo esponjoso (—) y peróxido de plomo (+), mientras que el electrólito es una solución de ácido sulfúrico en agua. La f.e.m. que puede producir esta pila cuando está completamente cargada, es de aproximadamente 2,1 volt, midiéndola a circuito abierto. La acción química que se produce dentro de la pila secundaria es similar a la de la pila voltaica. La solución electrolítica se ioniza produciendo dos iones hidrógeno positivos (H^+) y un ion sulfato negativo (SO_4^{--}). Cuando el ion sulfato entra en contacto con el plomo esponjoso, extrae un ion plomo (Pb^{++}) del electrodo dejándolo con un exceso de electrones. El ion sulfato y el ion plomo se unen y forman una molécula de sulfato de plomo ($PbSO_4$), que se deposita sobre la superficie del plomo esponjoso.

Ciclo de descarga

Puesto que existe una diferencia de potencial cuando la batería se conecta en un circuito exterior, los electrones fluirán desde el electrodo de plomo esponjoso a través de la conexión del circuito hasta el electrodo de peróxido de cobre. La



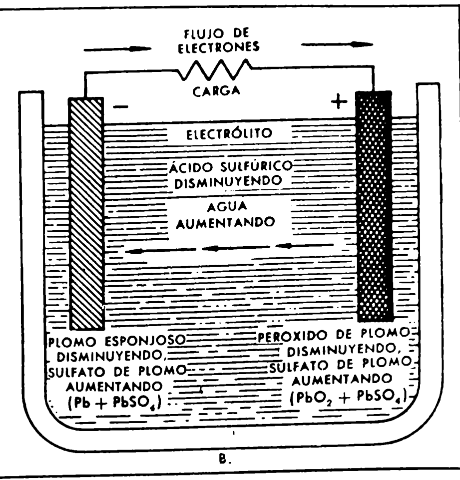


Figura 7-9. Acumuladores en la etapa de carga, en descarga y totalmente descargados

acción química que ocurre en el electrodo de peróxido de plomo, debido al movimiento de electrones, ocasiona la descomposición del peróxido en moléculas de agua (H_2O) y de sulfato de plomo ($PbSO_4$). La molécula de sulfato de plomo se deposita sobre la superficie del electrodo de peróxido de plomo.

La figura 7-9 B muestra la transformación química que tiene lugar cuando la pila entra en funcionamiento. Nótese que durante la descarga, cada electrodo aparece como disminuyendo sus propiedades iniciales, y aumentando el depósito de sulfato de plomo sobre el mismo. También disminuye la concentración del electrólito (ácido sulfúrico diluido).

En la figura 7-9 se presenta una pila descargada por completo. La figura muestra que una prueba de tensión a circuito abierto indicaría aproximadamente 1,75 volt en los terminales de la batería. Sin embargo, estando conectada a carga, la batería no puede proveer corriente suficiente para alimentar un circuito externo, debido a la alta resistencia causada por la acumulación de sulfato de plomo en los electrodos.

Ciclo de carga

La ventaja del acumulador sobre la pila primaria, como ya se ha señalado, es que puede ser reactivada o recargada a su condición original. El método usado para realizar la recarga de acumulador se muestra en la figura 7-10. La colocación de un generador de corriente continua en los terminales de la batería, como se ha indicado, provoca una inversión en la acción química entre los electrodos y el electrólito. La energía eléctrica del generador provee la fuerza que hace que los depósitos de iones de sulfatos vuelvan a la solución electrolítica, aumentando, en consecuencia, la concentración de ácido sulfúrico y volviendo los electrodos a su composición original. Esto se realiza por el proceso electroquímico conocido con el nombre de electrólisis, que hace que las molé-

culas del agua de la solución electrolítica se rompan en gas hidrógeno y oxígeno, que se unen con el sulfato y los iones de plomo respectivamente, para producir ácido sulfúrico y peróxido de plomo.

Comparación entre carga y descarga

Comparando la parte B de la figura 7-9 con la figura 7-10, se aprecia que el flujo de iones dentro de la solución electrolítica se invierte durante los ciclos de carga y descarga de la batería. Se confirma nuevamente la ley de transformación de la energía, puesto que la energía química fue transformada en eléctrica, y luego la eléctrica, desde una fuente externa, fue transformada nuevamente en energía química dentro del acumulador.

Construcción detallada de un acumulador

Los materiales que se emplean para los electrodos en el acumulador, o pila secundaria de ácido y plomo, son físicamente muy blandos y es imposible laminarlos. En la figura 7-11 se ofrece un ejemplo del método usado para obtener electrodos mecánicamente rígidos. Los materiales del electrodo están comprimidos dentro de las celdas de una sólida rejilla de plomoantimonio. La acción química del electrólito afecta en especial al plomo esponjoso o peróxido de plomo, y no a la rejilla de plomoantimonio.

Los electrodos de una batería están dispuestos de una manera especial, para poder colocar una gran cantidad de ellos en un pequeño espacio dentro de la batería. Las rejillas están colocadas una junto a otra, conteniendo alternativamente plomo y peróxido. Los terminales de conexión de las rejillas de plomo esponjoso están todas conectadas en paralelo, mediante una lámina negativa; y las placas de peróxido de plomo están conectadas en paralelo mediante una lámina positiva (fig. 7-12). La finalidad de esta disposición es dar al acumulador una gran superficie de electrodo para aumentar la generación de corriente. Como se ve en la figura, cada electrodo está protegido por placas separadoras para evitar cortocircuitos. Además, las láminas positivas y negativas están conectadas a los terminales de la batería.

El vaso de goma dura, suministra un recipiente de superficie áspera y resistente a la corrosión por ácidos, lo que permite guardar en su interior las placas y la solución electrolítica. Está construído de tal manera que suministra separación entre las celdas individuales del acumulador y un espacio al fondo para alejar cualquier sedimento que se produzca, como ser escamas del material de plomo blando de los electrodos e impurezas del electrólito, reuniéndolas y evitando el peligro de que

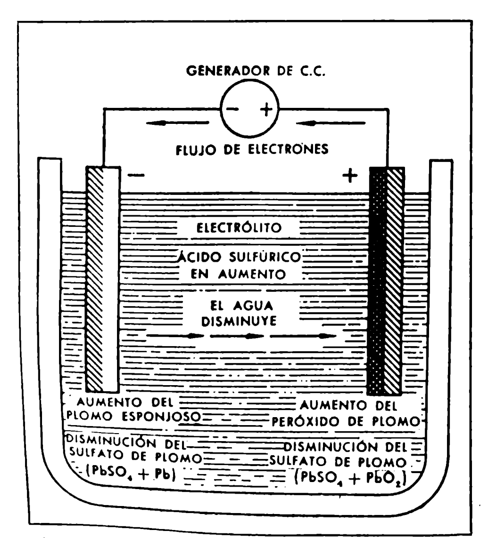


Figura 7-10. Pila secundaria en el proceso de recarga

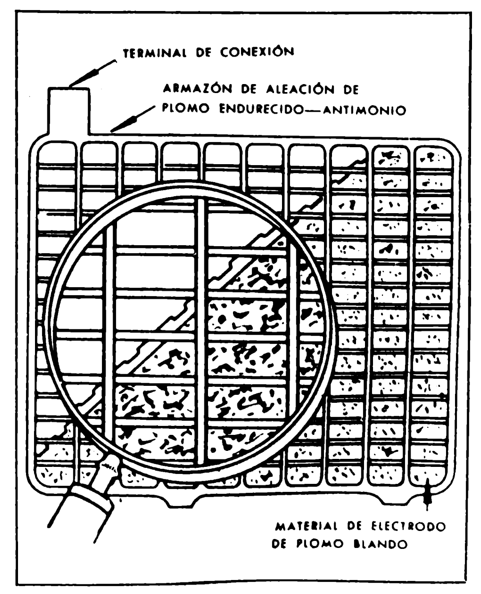


Figura 7-11. Vista ampliada de la estructura del electrodo

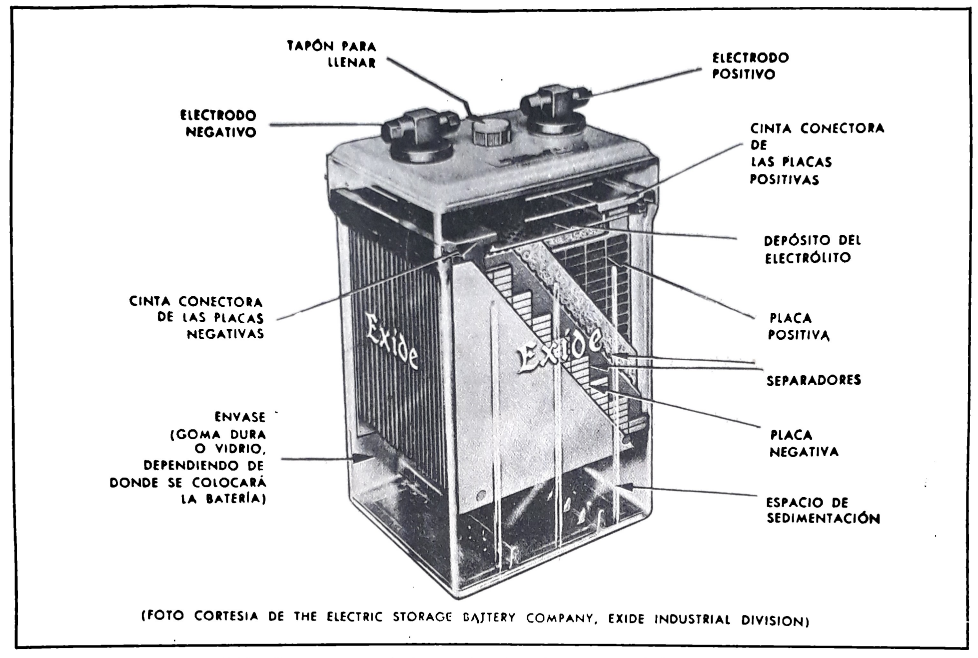


Figura 7-12. Corte mostrando la construcción de un acumulador simple utilizado en aplicaciones de emergencia, para iluminación o suministro de potencia

se pongan en cortocircuito las partes inferiores de las placas. Obsérvese que existe una separación adecuada entre los electrodos, para permitir el escape del gas que se forma en los procesos de carga, a través del agujero que se encuentra en la tapa, el que sirve además para llenar la batería con electrólito.

Las baterías comunes pueden estar compuestas de 3 ó 6 acumuladores para proveer una salida de 6 a 12 volt. La figura 7-13 muestra el método externo para conectar acumuladores para formar una batería de 6 volt.

Clasificación de los acumuladores

Existen 3 factores relacionados con esta clasificación: la tensión, la intensidad de la corriente y la capacidad de la batería. Estos factores no son exclusivos de las pilas secundarias pues se aplican también a las primarias.

Al estudiar la construcción de la batería se ha profundizado la teoría sobre la salida de tensión y corriente de cualquier batería. Si se recuerdan estos factores para mayor claridad, tenemos que: la tensión de cualquier batería depende del número de acumuladores colocados en serie; y la intensidad de la corriente depende de la superficie del electrodo y de la cantidad de electrólito.

La capacidad de la batería es una función de la corriente y del tiempo durante el cual puede suministrarse. Esta clasificación de la capacidad de la batería se expresa comúnmente en unidades de ampere-hora. Por ejemplo, si una batería es capaz de entregar 5 ampere de corriente por un período de 2 días, la capacidad de la misma sería 240 ampere-hora. Cuando un fabricante de baterías da la capacidad en ampere-hora, el tiempo y la cantidad de corriente que la batería entregara es igual a cualquiera de los submúltiplos de la clasificación ampere-hora. En consecuencia, una batería de 240 ampere-hora puede entregar 10 ampere durante 24 horas, 20 ampere durante 12 horas y así sucesivamente. Esta regla no es válida cuando se trata de corriente muy elevada consumida en poco tiempo; en este caso, el valor de

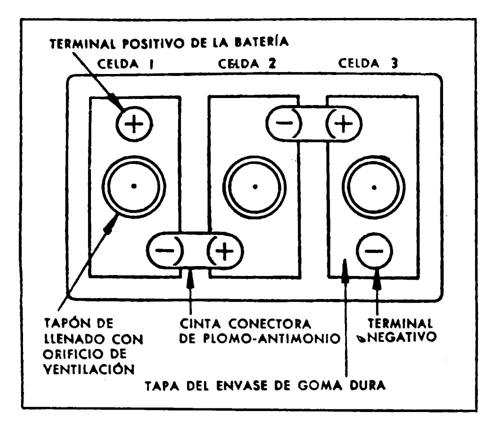


Figura 7-13. Vista superior de una batería de tres celdas mostrando el método para conectarlas en serie

la capacidad se reduce enormemente. Esto ocurre porque las burbujas de gas oxígeno que se desprenden de las placas de peróxido de plomo bloquean a éstas y reducen el área eficaz de las mismas.

Métodos de carga

Pueden dividirse en dos métodos principales: el de corriente constante, y el de tensión constante. La energía eléctrica necesaria para recargar una batería secundaria debe venir de una fuente de corriente continua. En los automóviles y otros vehículos, un generador de corriente continua acoplado al motor provee la corriente para recargar la batería. Además de aplicarse a los vehículos, se emplean sistemas parecidos en otros casos para proveer la corriente y tensión necesarias.

Carga a corriente constante

El método de corriente constante se usa para cargar una batería o varias conectadas en serie. Este método requiere una fuente de corriente continua con una tensión de salida mayor que la tensión de salida de una batería del grupo de baterías. Un ejemplo de circuito de carga constante se ilustra en la parte A de la figura 7-14. Nótese que el terminal positivo del generador de corriente continua está conectado al terminal positivo de la batería a través del reóstato y amperímetro, y que el terminal negativo está conectado al terminal negativo de la batería. Esta conexión tiene como resultado la inversión de corriente en el electrólito y los electrodos de la batería.

Cuando se está cargando la batería, el generador de C.C. se regula para producir una tensión ligeramente mayor que la tensión interna de la batería (1,75 volt por celda cuando está descargado) y la corriente decarga se elige entre 5 y 10 ampere. Ambos valores se regulan mediante el reóstato del circuito. Este proceso es muy lento (exige 20 a 30 horas para la carga completa) y se denomina comúnmente carga lenta. Permite un flujo de corriente de 5 a 10 ampere a través de la batería. La carga lenta tiene la ventaja de que conserva la temperatura interna de la batería a un nivel bajo, reduciendo el peligro de calentamiento (producido por el pasaje de una corriente a través de la alta resistencia interna de una batería descargada) que produce curvatura de las placas y, por lo tanto, cortocircuitos internos en la batería.

Carga a tensión constante

En la figura 7-14-B se puede apreciar el cargador de batería del tipo a tensión constante. Un cargador de baterías a tensión constante utiliza una fuente de C.C. con una tensión de salida constante, e incluye un amperímetro como monitor de la corriente circulante. A semejanza del cargador de corriente constante, la polaridad de C.C. combina con la de los terminales de la batería. Una diferencia de acoplamiento estriba en que si se desea cargar más de una batería por vez, las baterías adicionales deben ser colocadas en paralelo. La figura demuestra que es posible cargar dos baterías de distintas tensiones simultáneamente, mientras haya una resistencia en serie colocada en el circuito de la batería de potencial menor.

Cuando una batería descargada se coloca en un circuito de carga a tensión constante, la fuente de C.C. suministrará automáticamente una corriente de carga de aproximadamente 50 a 30 ampere, según se cargue una batería, dos o más de ellas. A medida que la batería comienza a cargarse, la tensión terminal aumenta, haciendo disminuir la tensión liberada por el generador. A medida que la batería va aumentando su carga, se requiere menos corriente para aumentar la carga; luego, la corriente en un cargador de carga lenta va disminuyendo durante el período de carga. Este tipo de circuito se llama a veces cargador en disminución, por el descenso gradual de la corriente aplicada.

El método a tensión constante es rápido comparado con el método a corriente constante, y requiere aproximadamente de seis a ocho horas para cargar completamente una batería.

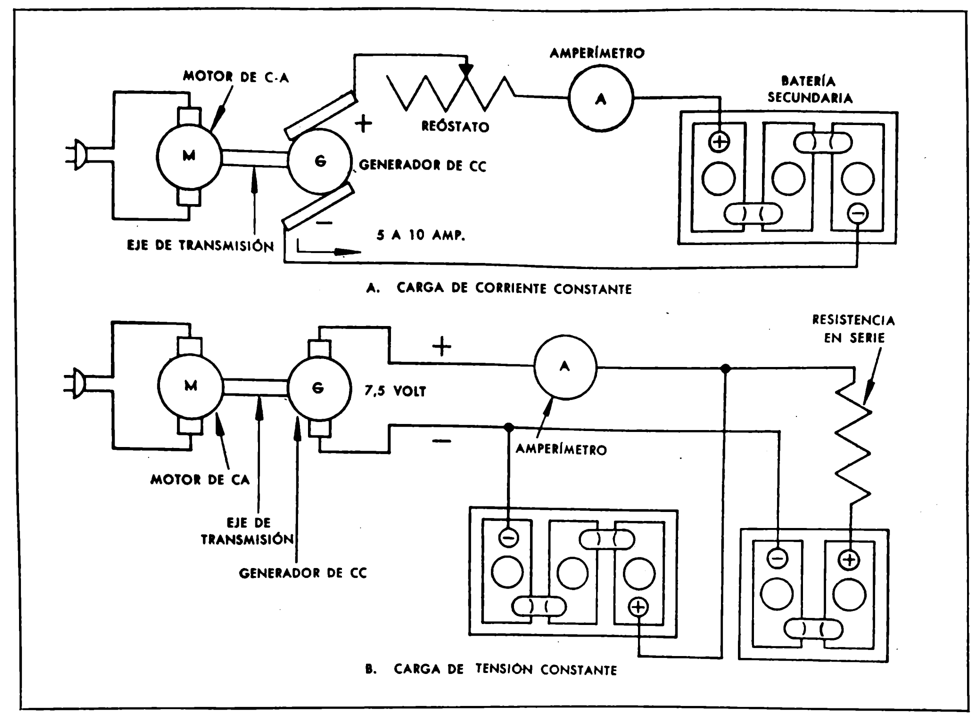


Figura 7-14. Circuitos para la carga de baterías de acumuladores

Métodos de carga especializados y precauciones

Otros métodos para cargar baterías, como ser los de carga rápida y de carga de compensación, son modificaciones del circuito a corriente constante y a tensión constante, respectivamente. La carga rápida provoca una corriente elevada (alrededor de 100 ampere), que pasa por la batería por un período corto, y luego una corriente más pequeña (30 a 50 ampere) completa la carga en 2 horas aproximadamente. La carga de compensación provee justamente la corriente necesaria para mantener un grupo de baterías a carga máxima para uso instantáneo.

En general, los fabricantes especifican los regímenes bajo los cuales las baterías deben cargarse. Estos regímenes deben ser observados fielmente para prevenir daños a los acumuladores. Si se carga una batería con un régimen muy elevado, el electrólito burbujea violentamente y se formarán cantidades excesivas de hidrógeno y gas oxígeno. Una acumulación excesiva de gas en un compartimiento puede causar una explosión. Es práctica común aflojar o retirar las tapas de llenado durante el proceso de carga, pues el orificio de ventilación de los tapones no será suficiente para la salida de gas. Asimismo, cualquiera sea el método empleado, se debe tener una adecuada ventilación en el lugar de trabajo. Debe mantenerse durante la carga el nivel del electrólito, agregando agua destilada para asegurar la total inmersión de los electrodos.

Electrólito de la batería y prueba del mismo

El electrólito de una batería de ácido-plomo sufre un cambio químico mientras se descarga la misma (se transforma en agua destilada), y mientras se carga (vuelve a ácido sulfúrico). Para mejor comprensión del electrólito y la prueba del mismo, se analizará su composición.

Electrólito

La solución electrolítica en una batería totalmente cargada se compone de 27 partes de ácido sulfúrico y 73 partes de agua. De la explicación sobre el manejo de una batería se deduce que la relación agua-ácido cambiará durante la descarga y carga de la misma. El ácido y el agua del electrólito pueden calcularse midiendo un volumen determinado de solución. Al comparar este peso con un volumen igual de solución de una batería totalmente cargada, se puede obtener el porcentaje de carga del mismo.

El método usado para determinar el porcentaje de ácido sulfúrico en el electrólito se llama *medición del peso específico.* El peso específico se define como la *relación existente entre el peso de un volumen dado de cualquier líquido y el peso de un volumen igual de agua.* Al agua se le da el valor de 1000. El peso específico del ácido sulfúrico puro puede hallarse utilizando la relación indicada:

$$\text{P.E.} = \frac{\text{peso de 1 pie cúbico de ácido sulfúrico}}{\text{peso de 1 pie cúbico de agua}}$$

$$= \frac{\text{114,3 libras por pie cúbico}}{\text{62,43 libras por pie cúbico}}$$

$$\text{P.E.} = 1830$$

Puesto que el peso específico del agua es 1000 y el del ácido sulfúrico 1830, el peso específico del electrólito de una batería (27 partes de ácido sulfúrico y 73 partes de agua) estará entre ambos. El peso específico de una batería totalmente cargada se encuentra entre 1270 y 1380.

Prueba del electrólito

Para medir rápidamente el peso específico del electrólito de una batería se utiliza un instrumento llamado "hidrómetro". El hidrómetro (medidor de agua) funciona en base al principio de Arquímedes; este principio sostiene que un cuerpo flotante se sumerge a mayor profundidad en un líquido de poco peso específico, que en uno de mayor peso específico.

El hidrómetro que se muestra en la figura 7-15 contiene un bulbo de vidrio con peso en un extremo, y una escala calibrada por el fabricante. Este bulbo flota libremente dentro de un cilindro de vidrio cuando éste se llena de líquido. El electrólito se introduce en el cilindro cuando se aprieta y luego se suelta la perilla de goma, mientras se mantiene el tubo de goma bajo la superficie del líquido. Un tope de goma perforado en el extremo superior del vidrio evita que el bulbo sea succionado dentro de la perilla. Cuando el electrólito entre en el cilindro, el bulbo flotará libremente y el peso específico del líquido puede leerse directamente en la escala. Es importante que el hidrómetro se sostenga en una posición perfectamente vertical, y que el bulbo flote libremente para obtener una indicación exacta. En la figura 7-16 se aprecia el punto de la escala donde se toma la indicación. Es el punto más bajo de la curva en la superficie del líquido. Esta curva se llama menisco.

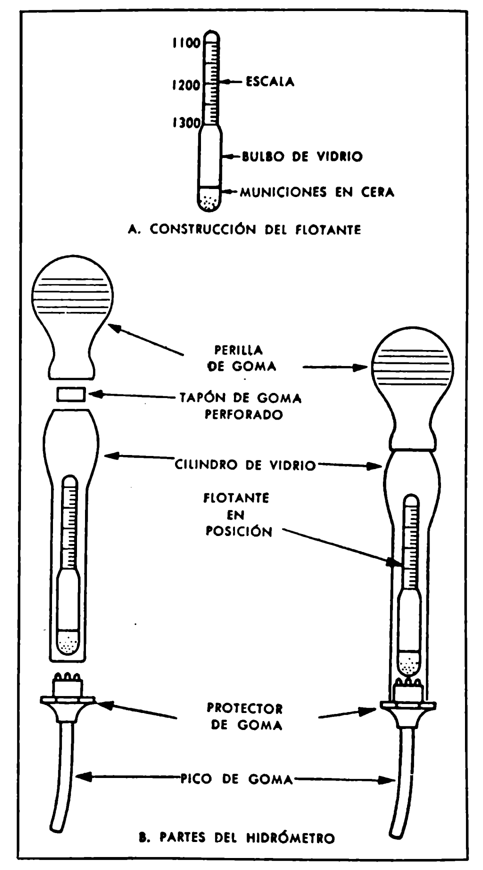


Figura 7-15. Hidrómetro

El peso específico de un electrólito varía con la temperatura. Los cambios de temperatura afectan el volumen de todo líquido. Generalmente, si la

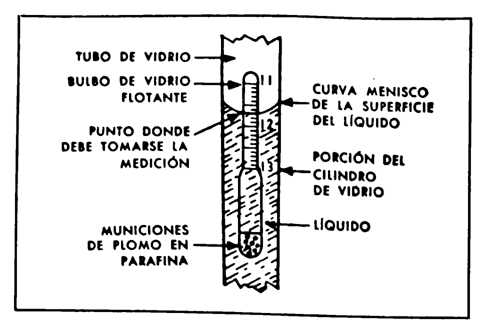


Figura 7-16. Método correcto para leer el peso específico

temperatura de un líquido aumenta, su volumen también lo hace; e inversamente, un descenso de temperatura provoca una disminución de volumen.

Para compensar este hecho, se provee una tabla con cada hidrómetro que da la corrección que se debe sumar o restar a la lectura del hidrómetro, para determinar el valor del peso específico verdadero del electrólito. Estúdiese la figura 7-17 e imagínese una lectura del hidrómetro de 1280, con una temperatura del electrólito de 40° Fahrenheit. Al observar la tabla se ve que 40° F requieren que se reste 0,016 de la indicación del hidrómetro, de lo cual resulta un valor corregido de 1264, lo que indica una carga parcial de la batería. Obsérvese en la tabla que 0,004 debe sumarse o restarse de la indicación del hidrómetro para cada 10° de temperatura del electrólito por encima o debajo de 80°F.

El hidrómetro es un instrumento de prueba bastante exacto para la medición del estado de una batería. Sin embargo, el método más exacto es una combinación de un medidor de peso específico (hidrómetro) y un medidor de tensión para circuito abierto o cerrado. La combinación de ambos indicará el estado real de la batería que determina la seguridad de la misma. El fabricante de las baterías facilitará instrucciones que deben ser seguidas para el mantenimiento de las mismas, y también el peso específico para climas cálido y frío.

Cuidado de las baterías de plomo y ácido

Una batería que ha sido mantenida y cuidada adecuadamente será segura y tendrá una mayor vida útil. Con referencia al mantenimiento hay algunos puntos que conviene tener en cuenta para aumentar el tiempo de vida útil de una batería:

1) Nunca permita que su batería permanezca descargada durante un período de tiempo relativamente largo. Recargándola inmediatamente, se evita la formación de cristales duros y blando. de sulfato que cierran los poros de los electrodos de plomo esponjoso provocando su eventual destrucción.

2) Manténgase el electrólito en un nivel adecuado con agua destilada. El nivel adecuado del electrólito es aproximadamente ⅜ de pulgada (1 cm) por encima de las placas (electrodos). Si no se observa el nivel, las placas se expondrán al aire y sobrevendrá una rápida sulfatación.

3) Manténganse las conexiones y terminales de la batería libres de depósito de verdín (sulfato de cobre), lavándolos con una mezcla de agua y bicarbonato o agua y amoníaco o agua caliente sola. Los depósitos son una forma de corrosión causada por el derrame de electrólito y son perjudiciales para la batería. Si se permiten estas formaciones, las mismas pueden crear una alta re-

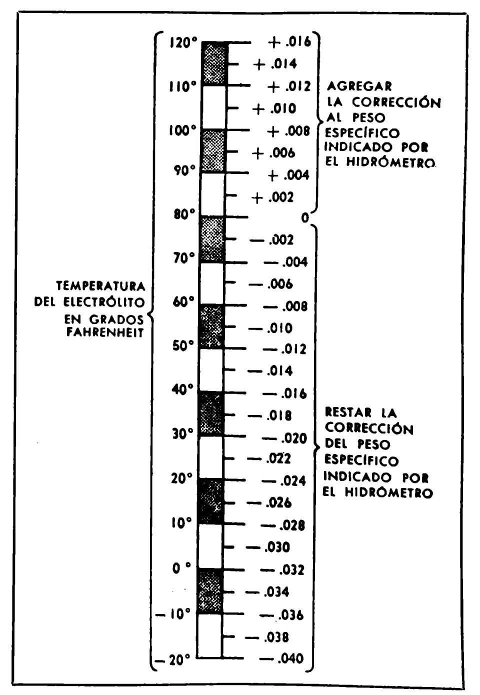


Figura 7-17. Tabla de conversión de temperatura para compensar errores en los valores indicados por el hidrómetro

sistencia al paso de la corriente que fluye, y en consecuencia descargar la batería.

4) En climas fríos manténgase la batería lo más altamente cargada posible. Este aspecto debe ser bien observado, puesto que el punto de congelamiento del electrólito depende de su peso específico, y a su vez, el peso específico depende de la carga de la batería. Si cae el peso específico del electrólito, el punto de congelamiento del mismo subirá.

5) Nunca se debe agregar ácido de más a una batería. En el supuesto caso de que se haya derramado un poco de electrólito, repóngase sólo la cantidad que se había perdido. En caso de reponer mayor cantidad de la necesaria se desperdiciará electrólito, puesto que sólo se aumentará el peso específico, dando indicaciones falsas y además impidiendo recargar adecuadamente la batería. Sólo una fuente de C.C. para recargar baterías puede cambiar químicamente el sulfato de plomo, y recargar la batería.

Acumulador Edison

Otro tipo de batería es la Edison, de Thomas A. Edison. Su uso no es tan común como el tipo plomo-ácido. Sus partes componentes son:

1. Níquel para el electrodo positivo.
2. Hierro para el electrodo negativo.
3. Hidróxido de potasio como electrólito.

El electrodo-positivo de níquel está formado por una hilera de tubos niquelados con bióxido de níquel, llenos de laminillas de níquel puro e hidróxido del mismo metal. El electrodo negativo de hierro consiste en una estructura de acero con cierto número de orificios rectangulares, o bolsillos, llenos de hierro puro. El electrólito consiste en un 21 por ciento de solución de hidróxido de potasio en agua destilada, al cual se agrega una pequeña cantidad de hidrato de litio.

El electrólito tiene un peso específico que oscila entre 1195 y 1215 cuando está totalmente cargado, y cambia muy poco (1160) cuando está descargado. Esto se debe a que cuando ocurre la acción química sólo una pequeña cantidad de potasio e hidróxido de litio entra en combinación con el hierro y el bióxido de níquel. Este proceso químico cambia gradualmente el hierro y el bióxido de níquel en óxido de hierro y óxido de níquel, a medida que la batería se descarga. La batería Edison totalmente cargada provee una tensión de 1,37 volt, y 1 volt cuando está totalmente descargada.

El método por el cual la batería Edison se recarga es el mismo método de corriente continua que se usa para baterías de ácido-plomo. Sin embargo, si el acumulador Edison se carga en dirección contraria, no se estropeará, con la condición de que la temperatura no exceda los 115°F.

Como el peso específico del electrólito de la batería de Edison cambia muy poco desde la condición de carga a la de descarga, el método más exacto de comprobar esta condición es medir la tensión a circuito cerrado.

Aunque la pila Edison es más liviana y tiene un lapso más largo de vida útil (15 a 20 años), no es tan extensamente usada como la de plomo, debido a su alto costo inicial y rendimiento extremadamente bajo a bajas temperaturas. Se usa principalmente en sistemas de iluminación de emergencia, o para vehículos propulsados a batería, como las zorras de las minas de carbón, o también para muchos tipos de señales ferroviarias.

RESUMEN

Las pilas primaria y secundaria dependen de una reacción química para producir una f.e.m. Cuando se utiliza una pila primaria, uno de los electrodos es detruido por la acción química mientras la pila produce corriente. En cambio una pila secundaria se puede recargar mediante una acción química inversa. Las pilas agrupadas en batería pueden conectarse en serie para suministrar una mayor tensión de salida, y en paralelo para suministrar mayor cantidad de corriente.

La batería secundaria de ácido-plomo es la de mayor uso. El estado de carga del acumulador puede determinarse mediante el peso específico del electrólito o por la medición de tensión en condiciones de carga. Debido al hecho de que el electrólito está compuesto por ácido sulfúrico y agua, debe tenerse cuidado en el manejo de estas baterías. Siempre que se desee preparar una solución de electrólito, se debe verter *el ácido en el agua, nunca echar el agua en el ácido*. El agua a utilizar debe ser pura (agua destilada).

Los acumuladores deben guardarse siempre cargados, especialmente en tiempo frío, para asegurar una vida más larga a la batería. También es necesario observar todas las precauciones mencionadas en lo relativo al cuidado y uso de las pilas primarias y secundarias.

CUESTIONARIO

1. ¿Cuál es la diferencia más notable entre la pila primaria y la secundaria?
2. ¿Se descompone o no el electrodo de la pila seca durante la descarga?
3. ¿Acumula electricidad la batería?
4. ¿Qué gases se forman durante la carga de un acumulador de plomo?
5. ¿Qué mide un hidrómetro?
6. Agregando ácido sulfúrico al electrólito de un acumulador se aumenta el peso específico, ¿recarga ello la batería? ¿Es un procedimiento aconsejable?
7. Utilizando la tabla de la figura 7-17, hallar la indicación corregida para un peso específico de 1,290 tomada a 10°F bajo 0°F.
8. ¿Es el peso específico de todas las baterías de plomo completamente cargadas, el mismo?
9. ¿Qué efecto tiene sobre el ampere-hora aumentar el ritmo de descarga de una batería?
10. ¿Qué efecto tiene en una batería ácido-plomo un excesivo ritmo de carga o descarga?
11. ¿Qué se agrega a un electrólito periódicamente para mantenerlo a un nivel apropiado?
12. ¿Cuál es el nivel adecuado del electrólito en una batería ácido-plomo?
13. ¿Cuál es la relación existente entre el peso específico del electrólito y su punto de congelamiento?
14. ¿Qué significa una comprobación de tensión a circuito abierto y una comprobación de tensión a circuito bajo carga?
15. ¿Qué es la acción local en una pila primaria?
16. ¿Es la tensión a circuito abierto de una pila mayor o menor que la tensión a circuito cerrado? ¿Por qué?
17. ¿Qué es la resistencia interna?
18. ¿Qué es la polarización?
19. ¿Qué efecto tiene la polarización en la resistencia interna de la pila primaria?
20. ¿De qué depende la cantidad de tensión obtenida en una pila primaria?
21. ¿De qué depende la cantidad de corriente obtenida de una pila primaria o secundaria?
22. ¿Cómo pueden conectarse varias pilas para aumentar su tensión total de salida?
23. ¿Cómo pueden conectarse varias pilas para aumentar su corriente total de salida?
24. En una batería que provee 2,5 ampere durante 12 horas, encuéntrese la capacidad dada en ampere-hora y el régimen normal de descarga.
25. ¿Por qué se deben sacar del equipo las pilas secas cuando éste no se usa?

CAPITULO VIII

Leyes de Kirchhoff Análisis de Circuitos de Corriente Continua

8-1 Introducción

La aplicación de la ley de Ohm ha permitido desarrollar y utilizar las distintas relaciones que existen entre corriente, tensión y resistencia de un circuito eléctrico, para poder calcular la corriente, caída de tensión y resistencia efectiva de los circuitos eléctricos. Las leyes estudiadas, que se aplican a circuitos en paralelo y en serie, permiten resolver la mayoría de los problemas de los circuitos eléctricos a su equivalente en circuitos sencillos. Sin embargo, estas leyes son a veces insuficientes para resolver ciertas redes complejas, donde se encuentran muchas ramas y fuentes de poder.

La historia nos relata que, alrededor de 1857, Gustav R. Kirchhoff, físico alemán, obtuvo por experimentación dos proposiciones que ampliaron el uso y la aplicación de la ley de Ohm. Las dos proposiciones de Kirchhoff fueron transformadas en leyes que se conocen como leyes de Kirchhoff y establecen:

1. La suma algebraica de las corrientes que concurren a un nodo (punto común) de corriente en un circuito eléctrico es igual a cero.
2. La suma algebraica de las fuerzas electromotrices y las caídas de tensión alrededor de cualquier circuito o malla eléctrica cerrada es igual a cero.

Por medio de la aplicación de las leyes de Kirchhoff a los circuitos, se podrán comprender las más complejas redes eléctricas. Problemas difíciles que en algunos casos sería imposible resolver usando la ley de Ohm, pueden ser fácilmente resueltos mediante el uso apropiado de estas leyes. Se debe destacar que las leyes de Ohm y otras leyes simples no deben por eso dejarse de lado, pues son la base de todo análisis de circuito.

Las leyes de Kirchhoff se pueden aplicar a cualquier circuito eléctrico y no están restringidas a los de corriente continua. En este capítulo se tratará el tema de los circuitos resistivos de corriente continua, considerados como la base para estudios más adelantados.

Las leyes de Kirchhoff tienen dos aplicaciones: en el cálculo de tensiones y corrientes requeridas para mantener el funcionamiento adecuado de las instalaciones de teléfonos conectadas a una o varias centrales, y en los laboratorios de investigación donde se revisan equipos viejos y nuevos para su buen funcionamiento.

Una aplicación práctica de un circuito resistivo que será tratado en este capítulo, es la red divisoria de tensión. Este circuito, además de cumplir una importante función en el equipo electrónico, nos indicará la necesidad de calcular la disipación de potencia eléctrica y suministrará más información para el uso de las leyes de Ohm y de Kirchhoff.

8-2 LEYES DE KIRCHHOFF

Como estas leyes están basadas en hechos conocidos relacionados con los circuitos eléctricos, será conveniente rever y ampliar algunas de estas importantes conclusiones, antes de proceder a la exposición detallada de las aplicaciones de las leyes de Kirchhoff.

En un circuito eléctrico, ya sea en serie, en serie-paralelo, o en paralelo, la distribución de tensiones ha sido explicada anteriormente como *caída de tensión* a través de un elemento o grupo de ellos en el circuito. En la figura 8-1, la disposición del circuito se ha resuelto mediante la aplicación de la ley de Ohm, donde las caídas de tensión a traves de los resistores individuales se indican: $E_{R1} = 100$ volt; $E_{R2} = 50$ volt y $E_{R3} = 50$ volt. Si se colocase un voltímetro a través de R_3, con la polaridad indicada del instrumento, se puede medir una caída de tensión de 50 volt. Se puede establecer que un punto A es 50 volt negativo con respecto al punto B (o que el punto B es 50 volt positivo con respecto al punto A). Si se deja una punta de prueba del instrumento en el punto A, y con la otra primero en C y después en D, indicará que el C es 100 volt positivo con respecto al A; y que el D es 200 volt positivo con respecto al A, o, lo que es lo mismo, el A es negativo con respecto a esos puntos, con igual diferencia de tensión. Esto muestra que las caídas de tensión en serie son aditivas, y que la polaridad es meramente la dirección de observación de una caída de tensión. Si se mira hacia un punto a partir del cual fluye corriente (como el punto A con respecto al punto C) la polaridad es negativa. Si el flujo de corriente se considera ahora como si tuviera el sentido de C hacia A, la polaridad es positiva. Nuestro punto de referencia es, a veces (no necesariamente), llamado tierra. Una parte del circuito o del equipo tendrá solamente un potencial de tierra, aunque use una cantidad de puntos de referencia para distintas mediciones. Como se explicó en el cap. 4, en un circuito en serie (tal como el presentado en la figura 8-1), la suma de las caídas individuales de tensión (R × I) a través de todo el circuito, debe ser igual a la tensión aplicada. El término caída de tensión puede aplicarse conjuntamente con la expresión: "positiva o negativa con respecto a", para indicar la polaridad de la caída de tensión con respecto a un punto de referencia conocido.

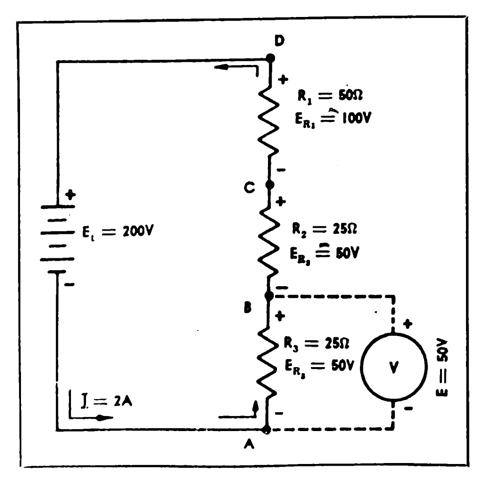


Figura 8-1. Caídas de tensión en un circuito eléctrico

En los capítulos anteriores se insistió constantemente en que el sentido del flujo de corriente en cualquier circuito electrónico se toma desde un punto de potencial negativo hacia un punto de potencial positivo. El sentido del movimiento de los electrones se mantendrá si la fuente de diferencia de potencial está aplicada continuamente al circuito. En el estudio de las leyes de Kirchhoff se considerará que la corriente fluye desde el terminal negativo de una fuente de f.e.m., a través del circuito exterior, retornando al terminal positivo de la fuente. Así, en la figura 8-1, la corriente total del circuito aparece circulando desde el terminal negativo de la batería, a través de los resistores conectados en serie, hasta llegar al terminal positivo de la batería. Si se recuerda el significado de los términos tensión, polaridad, punto de referencia y sentido del flujo de corriente, se podrá comprender la relación existente entre las leyes de Kirchhoff y las leyes para circuitos en serie y en paralelo.

Explicación de las leyes de Kirchhoff

En la siguiente explicación de las leyes de Kirchhoff, la ley de la tensión será considerada antes que la ley de corriente. La segunda ley, o ley de tensión, se considera primero para mayor facilidad de comprensión.

Ley de tensiones de Kirchhoff (2ª ley)

"La suma algebraica de las fuerzas electromotrices y las caídas de tensión alrededor de cualquier malla o red eléctrica cerrada es igual a cero". O, lo que es lo mismo, la suma de las caídas de tensión en un circuito en serie, es igual a la tensión aplicada. Para entender mejor esta ley, véase nuevamente la figura 8-1 y supóngase que la

corriente fluye en el sentido de las flechas. La fórmula de la tensión total del circuito (E_t), es:

$$E_t = I R_3 + I R_2 + I R_1 \qquad (8\text{-}1)$$

El orden indicado de la caída de tensión: IR_3; IR_2; IR_1, se debe al hecho de que al recorrer un circuito eléctrico (sin tener en cuenta su sencillez), es usual seguir el flujo de la corriente eléctrica.

La ley de las tensiones de Kirchhoff indica que la suma de las caídas de tensión y fuentes de tensión, alrededor de una malla o red eléctrica completa, será igual a cero. Comenzando en el punto A de la figura 8-1, sígase el circuito en el sentido del flujo de la corriente. Recuérdese el hecho de que cuando se encuentra un resistor existe una caída de tensión sobre dicho componente; esta caída es sustractiva pues representa una pérdida a través de la totalidad del circuito. La caída de tensión se indica como tal con un signo negativo (—) para señalar que por el componente se obtiene o resulta una caída de tensión o caída IR. Al recorrer el circuito del punto A al punto D, las caídas de tensión son como sigue:

$$-IR_3 - IR_2 - IR_1 \qquad (8\text{-}2)$$

Si se continúa siguiendo el flujo de corriente del punto D al punto A, se encuentra la batería, que es la fuente de tensión de todo el circuito. En consecuencia, la tensión (E_t) producida por la batería se indica con el signo positivo (+) para indicar la fuente de potencial. Las caídas de tensión individuales de las resistencias y la tensión de la batería se colocan en una ecuación que satisfaga la ley de tensión de Kirchhoff, y el resultado es el siguiente:

$$-IR_3 - IR_2 - IR_1 + E_t = 0 \qquad (8\text{-}3)$$

Al comparar la ecuación (8-1) con la (8-3) se nota que son matemáticamente iguales, aunque la ecuación (8-3) ha sido reordenada para igualar a cero.

Los valores de resistencia y la tensión total se indican en la figura (8-1). Se reemplazan estos valores en la ecuación (8-3), y se determina como sigue la cantidad de corriente que fluye en el circuito, de la siguiente forma:

$$-25I - 25I - 50I + 200 = 0$$

se suman términos de la misma característica:

$$-100I + 200 = 0$$

y trasponiendo la ecuación y despejando I

$$-100I = -200$$

$$I = \frac{-200}{-100}$$

$$I = 2 \text{ ampere}$$

Este valor de corriente calculado, concuerda con el indicado en la figura (8-1).

En este ejemplo de la ley de tensión de Kirchhoff, la corriente del circuito fue determinada por el uso de las caídas de tensión y fuentes de tensión (f.e.m.) en el circuito. Debe destacarse que el punto usado (punto A) como comienzo y final de una malla completa, fue simplemente un punto elegido al azar. Si se hubiera elegido el punto B en lugar del A, la ecuación resultante sería (una vez más siguiendo el flujo de la corriente):

$$-IR_2 - IR_1 + E_t - IR_3 = 0$$

$$-25I - 50I + 200 - 25I = 0$$

$$-100I = -200$$

$$I = \frac{-200}{-100}$$

$$I = 2 \text{ ampere}$$

Nótese que el mismo resultado se obtuvo para la corriente cuando se uso el punto B o cuando se empleó el A, como puntos iniciales. El resultado sería el mismo si se hubieran usado los puntos C y D como puntos iniciales.

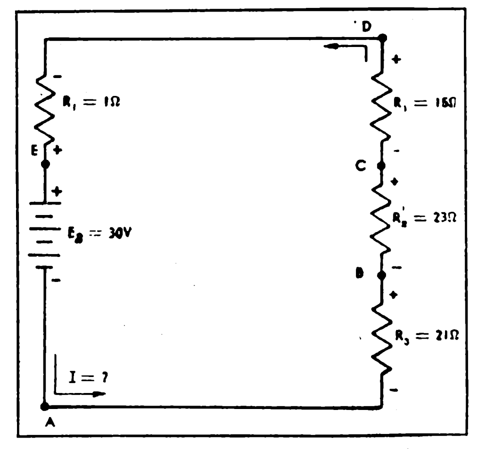


Figura 8-2. Circuito eléctrico simple, serie

Como segundo ejemplo, el circuito ilustrado en la figura 8-2 muestra 3 resistores conectados a una batería que tiene una f.e.m. de 30 volt, y una resistencia interna de 1 ohm. Se comienza con el terminal negativo de la batería (punto A) y usando la ley de tensión de Kirchhoff para resolver I, la ecuación resultante será:

$$-IR_3 - IR_2 - IR_1 - IR_i + 30 = 0$$

$$-21I - 23I - 15I - 1I + 30 = 0$$

$$-60I = -30$$

$$I = 0{,}5 \text{ ampere} \qquad (8\text{-}4)$$

En algunos circuitos complicados, el sentido del flujo de corriente no es claramente visible; por lo tanto, el sentido supuesto para el flujo de corriente puede ser o no el correcto. Esta elección no presenta ninguna dificultad si se escribe la ecuación de tensión de Kirchhoff *siguiendo* el sentido supuesto para la corriente del circuito. Recuérdese siempre que una caída de tensión que va en sentido contrario al sentido supuesto para la corriente, y una f.e.m. productora de corriente en el mismo sentido que el supuesto, llevan signo positivo, mientras que una caída de tensión con el mismo sentido de la corriente, y una f.e.m. que produce un flujo opuesto al sentido supuesto para la corriente, llevan signo negativo. Estos signos son independientes de la polaridad de la f.e.m. del circuito. Para ilustrar un caso en el cual se aplican los factores arriba citados, se supone que el sentido de corriente elegido es inverso al real (fig. 8-2). Luego, se supondrá que la corriente del circuito fluye desde E, a través de los resistores exteriores (R_i; R_1; R_2 y R_3) y la batería, volviendo al punto E. Si se toma en cuenta el sentido considerado la ecuación de la ley de Kirchhoff será:

$$-IR_i - IR_1 - IR_2 - IR_3 - E = 0$$

Se sustituyen los valores indicados, y resolviendo para I:

$$-1I - 15I - 23I - 21I - 30 = 0$$

$$-60I = 30$$

$$I = \frac{30}{-60}$$

$$I = 0{,}5 \text{ ampere} \qquad (8\text{-}5)$$

Al comparar el resultado en la ecuación (8-4) con el de la (8-5), se observa que el valor numérico 0,5 es el mismo en ambos casos. Sin embargo, cuando se dio un sentido equivocado a la corriente, el resultado numérico (ecuación 8-5) resultó precedido por el signo menos (—). Si la corriente resultante calculada lleva signo negativo, el verdadero sentido de la corriente será opuesto al supuesto. Una vez analizado y comprendido este ejemplo, los puntos subsiguientes resultarán claros:

1. Las caídas de tensión se hallan siguiendo la resistencia en el sentido supuesto para el flujo de corriente.

2. El sentido asignado al flujo de corriente carece de importancia mientras no sea cambiado durante la solución del problema.

3. El valor de la corriente calculada será precedido por un signo negativo (—) si el sentido que se asignó al flujo de corriente es opuesto al real.

Mediante la ley de Kirchhoff para tensiones, puede obtenerse una ecuación que permita calcular el valor de un parámetro (elemento) desconocido (como la corriente en los ejemplos anteriores). Esto, por supuesto, requiere el conocimiento previo de los valores de los demás parámetros que constituyen la ecuación del circuito (como ser resistencias y f.e.m.).

Ley de Kirchhoff para corrientes (1ª ley)

"La suma algebraica de las corrientes que concurren en un nodo (punto de bifurcación) de un circuito, es igual a cero". O, en otra forma: la suma de las intensidades de corriente que llegan a un nodo es igual a la suma de las corrientes que salen del mismo. Como ejemplo de esta ley, obsérvese la figura 8-3, y supóngase que el sentido de la corriente está indicado por las flechas llenas. La fórmula para la corriente total del circuito que entra por el punto B y sale por el punto C, es:

$$I_t = I_1 + I_2 \qquad (8\text{-}6)$$

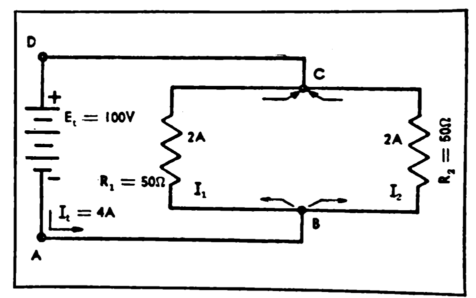


Figura 8-3. Forma de hallar la corriente total por medio de las leyes de Kirchhoff para corrientes

De los estudios previos sobre circuitos paralelos, se deduce que la corriente total del circuito se divide en el punto de unión B en corrientes de las ramas individuales I_1 e I_2. En forma similar estas corrientes de las ramas individuales se recombinan en el punto C para formar nuevamente la corriente del circuito I_t.

La ley de corriente de Kirchhoff establece que la suma de las corrientes en una unión de un circuito es igual a cero. Desde el punto A de la figura 8-3, sígase a través del circuito en el sentido del flujo de la corriente. Si se recuerda la aseveración de que la corriente se divide en el punto de unión, la corriente total que entra en el punto de unión B ($I_t = 4A$), se dividirá en proporción al valor de resistencia de cada rama. Pues-

to que ambas resistencias de cada rama son iguales en valor, las corrientes de I_1 e I_2 serán, sumadas, igual a 2 ampere.

Cuando se sigue un flujo de corriente hacia una unión, la corriente que entra en la misma siempre es precedida por un signo positivo (+). En este caso, la corriente I_t se escribe $+ I_t$ en el punto de unión B. Asimismo, la corriente que sale de la unión siempre es precedida por un signo negativo (—). Esto quiere decir que en el circuito de la figura 8-3, las corrientes de las ramas I_1 e I_2 se escriben $-I_1$ y $-I_2$, respectivamente, cuando se considera el punto de unión B. Las corrientes en la unión B pueden ahora representarse por la ley de corriente de Kirchhoff:

$$+ I_t - I_1 - I_2 = 0 \qquad (8\text{-}7)$$

Al comparar la ecuación (8-6) con la ecuación (8-7), se nota que son matemáticamente iguales, aunque la ecuación (8-7) se ha reordenado para igualar a cero. Al insertar los valores de corriente en la ecuación (8-7), como se indica en la figura (8-3), resulta correcta la ecuación para la ley de corriente de Kirchhoff, según puede verse:

$$+ 4 - 2 - 2 = 0$$
$$+ 4 - 4 = 0$$
$$0 = 0$$

En consecuencia, la suma de las corrientes en la unión B es igual a cero.

Con un procedimiento similar, se puede demostrar que la suma de las corrientes en el punto de unión C es igual a cero. Como las corrientes que entran en una unión deben ser precedidas por un signo positivo, mientras que las que salen de la unión deben ser precedidas por un signo negativo, la ecuación que se obtiene aplicando la ley de corriente de Kirchhoff en la unión C es:

$$+ I_1 + I_2 - I_t = 0$$

sustituyendo los valores indicados:

$$+ 2 + 2 - 4 = 0$$
$$+ 4 - 4 = 0$$
$$0 = 0$$

Queda así probada la validez de la ley de corrientes de Kirchhoff, como se ha aplicado al punto C.

Al considerar la ley de Kirchhoff para tensiones, se estableció que no es necesario conocer el sentido exacto del flujo de la corriente puesto que la dirección puede ser supuesta. Este factor también se aplica a la ley de corriente de Kirchhoff. Por ejemplo, supóngase que el flujo de la corriente en la figura 8-3 sea invertido. Es decir, que ahora la corriente fluye del terminal positivo de la batería (punto D) a la unión C, a través de las ramas paralelas a la unión B, al punto A, a través de la batería y de vuelta al punto D. De acuerdo con la ley de Kirchhoff de corriente, la suma de corrientes en la unión C es:

$$+ I_t - I_1 - I_2 = 0$$
$$+ 4 - 2 - 2 = 0$$
$$+ 4 - 4 = 0$$
$$0 = 0$$

En forma similar, la suma de las corrientes en la unión B es:

$$+ I_1 + I_2 - I_t = 0$$
$$+ 2 + 2 - 4 = 0$$
$$+ 4 - 4 = 0$$

De estos ejemplos se aclaran los siguientes puntos:

1. La suma de las corrientes convergentes a un punto de unión es igual a la suma de las corrientes que salen de esa unión.

2. No es necesario conocer el presunto sentido del flujo de corriente, sea o no el verdadero, pues no es cambiado durante la solución del problema.

3. La corriente que entra a una unión es precedida por un signo positivo (+), y la corriente que deja la misma es precedida por un signo negativo (—).

8-3 APLICACIÓN DE LAS LEYES DE KIRCHHOFF

En los ejemplos siguientes de aplicación, se buscarán los valores de corriente de dos circuitos simples para familiarizarse con los mecanismos de las dos leyes, ya sea en aplicación separada o conjunta.

Circuitos en serie con dos fuentes de tensión

Considérese primeramente el caso de un circuito simple en serie, con dos fuentes de tensión ayudándose mutuamente. Tal circuito se ilustra en la parte A de la figura (8-4). Se supone que el flujo de corriente es el indicado; la corriente total del circuito (I) puede determinarse por la aplicación de la ley de tensión de Kirchhoff. En consecuencia, comenzando en el punto A y con un sentido contrario a las agujas del reloj, la ecuación y solución resultante será:

$$-IR_1 + E_2 - IR_2 + E_1 = 0$$
$$-20I + 100 - 30I + 200 = 0$$
$$-50I + 300 = 0$$
$$-50I = -300$$
$$I = 6 \text{ ampere}$$

Los valores combinados de las baterías representan una tensión única de 300 volt, pues están conectadas en serie y se suman. Si una de las baterías estuviera invertida, sus valores combina-

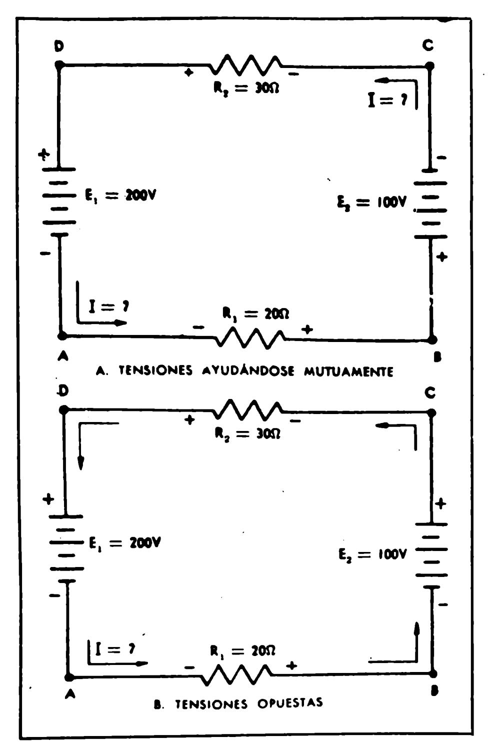


Figura 8-4. Circuitos simples en serie con dos fuentes de tensión, reforzándose mutuamente y en oposición

dos representarían de todas maneras una sola fuente de tensión; sin embargo, el valor de la tensión de la fuente sería ahora la diferencia entre las tensiones de las baterías.

En lo que respecta a la figura 8-4 B, la disposición del circuito es la misma que la de 8-4 A, excepto que la polaridad de la batería E_2 ha sido invertida. Si se supone que el flujo de la corriente es el indicado, la intensidad total del circuito calculada mediante la ley de Kirchhoff para tensiones, será:

$$-IR_1 - E_2 - IR_2 + E_1 - 0$$
$$-20I - 100 - 30I + 200 = 0$$
$$-50I + 100 = 0$$
$$-50I = -100$$
$$I = 2 \text{ ampere}$$

Al comparar este valor calculado de corriente con el calculado para el caso en que las baterías estaban conectadas en serie, se puede observar que la corriente total del circuito disminuye cuando las baterías se oponen una a la otra. Esto se explica recordando la relación existente entre corriente y tensión, según se explicó antes en el tópico Ley de Ohm: $I = \frac{E}{R}$. Si el valor de la tensión disminuye mientras la resistencia permanece constante, la corriente decrecerá. El cálculo de magnitudes en circuitos en serie con más de dos fuentes de tensión se realiza en forma similar a la arriba explicada.

Circuito en paralelo con una fuente de tensión.

Para explicar la ley de Kirchhoff para corriente se usó anteriormente un circuito en paralelo sencillo con una sola fuente de tensión. En aquel ejemplo (fig. 8-3) se utilizaron ramas con resistencias iguales para simplificar la explicación. Ahora se usa un circuito semejante que tiene distintas resistencias, para mostrar la aplicación de las dos leyes de Kirchhoff.

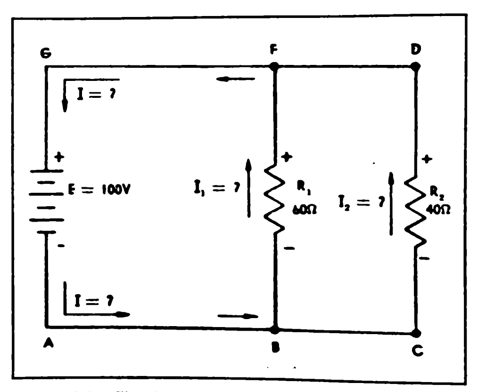


Figura 8-5. Circuito paralelo con una fuente de tensión

En la figura 8-5 podemos observar que el circuito tiene dos mallas cerradas (ABFGA y ABCDFGA) y dos nodos (B y F). De acuerdo con la ley de Kirchhoff para intensidades, la suma de las corrientes en ambos nodos es igual a cero. O sea entonces, que la corriente total (I), que va hacia el nodo B, es igual a la suma de las corrientes de las ramas I_1 e I_2 que salen del nodo B. De la misma manera, la corriente total que sale del nodo F, es igual a la suma de las corrientes de las ramas I_1 e I_2 que entran al mismo nodo.

De acuerdo con la ley de tensión de Kirchhoff, la suma algebraica de la tensión alrededor de cual-

quier espira cerrada es igual a cero. En consecuencia, la suma de las tensiones alrededor de ABFGA es igual a cero, y alrededor de ABCDFGA también es igual a cero. Esto es debido a que algunas de las mismas tendrán signo positivo (+) y otras negativo (—). Por esta razón es importante observar las reglas de la sección (8-2), en cuanto se refiere al signo de las caídas de tensión y las fuentes de la misma, cuando se recorre una malla cerrada con un flujo supuesto.

Mediante el uso de los valores indicados en la figura 8-5, y las dos leyes de Kirchhoff, se calcurá la corriente total en el circuito y las ramas I_1 e I_2.

Desde el punto A y continuando en sentido contrario a las agujas del reloj alrededor de la malla ABFGA, la ecuación derivada de la ley es:

$$-I_1R_1 + E = 0$$

Nótese que la caída de tensión a través de la resistencia R_1 es negativa (—), porque a través de ella se recorrió el circuito con el supuesto sentido del flujo de corriente. La tensión de la batería es (+) porque el sentido supuesto de la corriente se dirige hacia el terminal positivo (+) de la batería. Por sustitución de los valores indicados de R_1 y E en la ecuación, y despejando I_1, resulta:

$$-I_1R_1 + E = 0$$
$$-60_1 + 100 = 0$$
$$-60\ I_1 = -100$$
$$I_1 = 1{,}67 \text{ ampere}$$

Se comienza nuevamente en el punto A y siguiendo el mismo sentido alrededor de la malla ABCDFGA, la ecuación de la misma derivada de la ley de tensión de Kirchhoff será:

$$-I_2R_2 + E = 0$$

Se sustituyen los valores indicados de R_2 y E en la ecuación, y resolviendo para I_2, resulta:

$$-40\ I_2 + 100 = 0$$
$$-40\ I_2 = -100$$
$$I_2 = 2{,}5 \text{ ampere}$$

De acuerdo con la ley de corriente de Kirchhoff, el valor de la corriente que entra al punto de unión B, debe ser igual al valor de la corriente que deja este punto. En forma de ecuación esto se simboliza:

$$I = I_1 + I_2$$

Se sustituyen los valores calculados de corriente para I_1 e I_2, en la ecuación, y el valor de I resultará:

$$I = 1{,}67 + 2{,}5$$
$$I = 4{,}17 \text{ amperes}$$

En forma similar, el valor de la corriente que deja el punto de unión F debe ser igual al de la corriente entrante; así tenemos:

$$I_1 + I_2 = I$$
$$1{,}67 + 2{,}5 = I$$
$$4{,}17 \text{ ampere} = I \text{ en la unión F}$$

La resistencia equivalente de las ramas paralelas del circuito puede determinarse fácilmente por el uso de la ley de Ohm, puesto que se conocen la tensión aplicada y la corriente total del circuito. Se reemplazan los valores dados en la ecuación de la ley de Ohm para resistencias, y la resistencia total del circuito será:

$$R_t = \frac{E}{I} = \frac{100}{4{,}17} = 24 \text{ ohm}$$

Recuérdese que la ley de tensión de Kirchhoff establece que la suma algebraica de las tensiones de una malla cerrada es igual a cero. Nótese que la ley no especifica una malla en especial de un circuito. Se observa en la figura 8-5 que se forma una malla con los puntos BCDFB. En consecuencia, podría usarse esta malla en lugar de una de las otras, cuando se calcula la corriente de las ramas y la total del circuito. Como ejemplo, resuélvase el de la figura 8-5 para los valores requeridos, usando las mallas ABFGA y BCDFE.

De las dos soluciones precedentes de los circuitos de las figuras 8-4 y 8-5, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

1. Carece de importancia la elección de la malla para aplicar la ley de Kirchhoff para tensiones. El único requisito es que esta ley sea aplicada al circuito un número de veces suficiente, como para incluir cada rama en el circuito por lo menos una vez.
2. La ley de Kirchhoff para corrientes debe ser aplicada a un número tal de nodos, que cada corriente sea incluida por lo menos una vez.

Aplicaciones de los circuitos en serie-paralelo

Las disposiciones de circuitos utilizadas para ilustrar las dos leyes de Kirchhoff, han sido siempre circuitos simples en paralelo o en serie. En estos circuitos, las mallas cerradas, o circuitos secundarios, eran fácilmente distinguibles; también lo eran las corrientes que entraban y salían de los nodos. En algunos circuitos complejos, estos factores pueden no ser tan evidentes; por lo tanto, para aplicar adecuadamente las leyes de Kirchhoff para tensión y corriente en la solución de tales circuitos, debe aplicarse el proceso detallado a continuación para circuitos en serie-paralelo.

1. Después de leer cuidadosamente el problema, dibujar un diagrama esquemático del circuito e indicar los valores de todas las magnitudes conocidas (tensión, corriente y resistencia). Poner letras a los nodos importantes del circuito.

2. Indicar la polaridad de cada fuente de tensión.
3. Elegir e indicar un sentido para la corriente en cada porción del circuito y designar luego las corrientes, por separado, en cada rama, con las letras I_1; I_2; I_3; etc.
4. Marcar la polaridad de las caídas de tensión en los resistores, colocando un signo negativo (—) en el extremo por el cual entra la corriente al resistor y un signo positivo en el terminal por donde sale.
5. Escribir la ecuación de tensiones, según la ley de Kirchhoff para tensiones, para cada malla del circuito. Recordar que carece de importancia cuál es la malla elegida; el único requisito es aplicar la ley al circuito un número de veces suficiente como para incluir todas las ramas en el circuito, cada una de ellas por lo menos una vez. Para hallar el signo de cada tensión en la malla se procederá así:

a) Se comienza en un punto elegido se recorre la malla en un sentido, escribiendo por turno la expresión de cada tensión o caída de tensión que se encuentre. No interesa el sentido en que se haga. Se sigue trazando en el sentido elegido, mientras el circuito continúe.

b) Cuando se recorre desde el terminal negativo hacia el positivo a través de una parte componente del circuito, la caída de tensión lleva signo negativo.

c) Cuando se traza desde el terminal positivo hacia el negativo, a través de una parte del circuito, la caída de tensión lleva signo positivo.

d) Cuando se traza a través de una fuente de tensión que produce un flujo de corriente en la dirección supuesta, se atribuye a la tensión un signo positivo. Si la fuente de tensión produce un flujo de corriente opuesto a la dirección supuesta, se atribuye a la tensión un signo negativo.

6. Escríbase la ecuación de la corriente en concordancia con la ley de corriente de Kirchhoff, para cada punto de unión en el circuito. Recuérdese que esta ley debe aplicarse a un número tal de nodos que se incluya cada valor conocido por lo menos una vez.
7. Un signo negativo que precede una corriente, indica que la elección de la dirección tomada para flujo de la misma (paso 3) fue incorrecta. La corriente fluye en dirección contraria.

Circuitos en serie-paralelo con dos fuentes de tensión

Mediante un procedimiento sistemático, puede lograrse la solución de los complejos problemas de circuitos insolubles por la ley de Ohm por el uso de las leyes de Kirchhoff. Aplicaremos ahora el procedimiento para resolver un ejemplo.

Tenemos un circuito que contiene dos fuentes de tensión: un generador de corriente continua de 24 volt (E_1) y una batería de 6 volt (E_2), como se ilustra en la parte A de la figura 8-6. Los valores de resistencia para R_1, R_2, R_3, R_4 y R_5 son 4 ohm, 6 ohm, 6 ohm, 8 ohm y 36 ohm, respectivamente. El flujo de corriente a través de la fuente de tensión E_1 se llama I_1, y el flujo de corriente de la fuente E_2 se llama I_2. El flujo por R_5 se llama I_5. Los sentidos supuestos de estas corrientes son tal cual se indican con las flechas. La corriente I_1 fluye del terminal negativo del generador de corriente continua, a través de las resistencias R_1; R_5 y R_4, y nuevamente al terminal positivo. La corriente I_2 fluye del terminal negativo de la batería de 6 volt, a través de las resistencias R_2; R_5 y R_3, nuevamente al terminal positivo de la batería. Nótese que el flujo de corriente a través de R_5 es una combinación de las corrientes I_1 e I_2. Por medio de la aplicación de las leyes de Kirchhoff de corriente y tensión, y siguiendo el procedimiento sistemático arriba mencionado se pueden obtener los valores de I_1; I_2 e I_5.

La parte B de la figura 8-6 muestra el mismo circuito que la parte A, excepto que ha sido dibujada nuevamente, y los valores de resistencia, sentido del flujo de corriente y polaridad de las caídas de tensión se indican ahora para cada resistencia. Al aplicar la ley de corriente de Kirchoff directamente a la figura, los tres valores desconocidos de corriente pueden reducirse a 2 valores desconocidos. Y así, I_5 se obtiene de la suma algebraica $I_1 + I_2$.

Se comienza en el punto A y siguiendo un sentido contrario a las agujas del reloj alrededor de la malla ABCGHIA, se tendrá la siguiente ecuación derivada de la ley de tensión de Kirchhoff:

$$-I_1R_1 - I_5R_5 - I_1R_4 + E_1 = 0 \qquad (8\text{-}8)$$

Puesto que el valor de I_5 es igual a la suma algebraica de I_1 e I_2, sustituyendo estos valores en la ecuación por I_5 resulta:

$$-I_1R_1 - (I_1 + I_2)\, R_5 - I_1R_4 + E_1 = 0 \qquad (8\text{-}9)$$

Nótese que ahora hay sólo dos valores desconocidos de corriente (I_1 e I_2) puesto que I_5 ahora se expresa: $I_1 + I_2$.

Para reducir la ecuación (8-9) a su expresión más simple úsese el procedimiento siguiente:

Sustitúyanse los valores dados de resistencia y tensión en la ecuación:

$$-4I_1 - 36\ (I_1 + I_2) - 8I_1 + 24 = 0$$

sacando el paréntesis:

$$-4I_1 - 36\,I_1 - 36I_2 - 8I_1 + 24 = 0$$

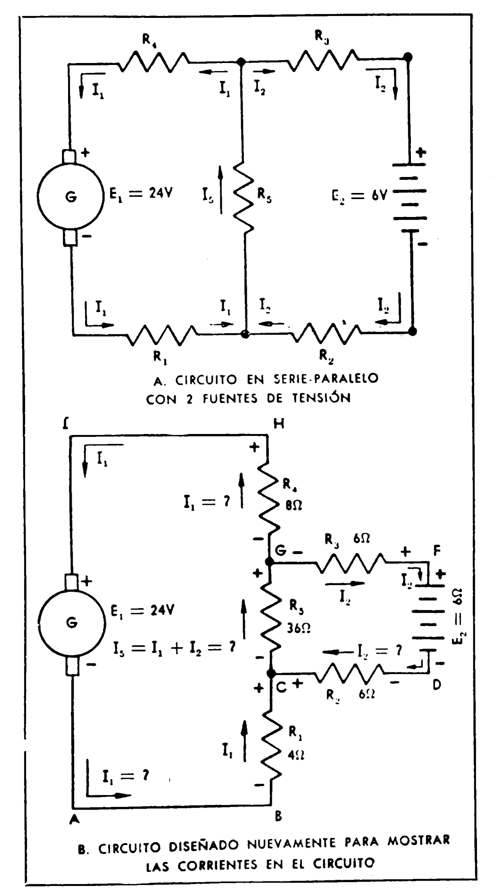


Figura 8-6. Circuito serie-paralelo, con dos fuentes de tensión

sumando términos iguales:

$$-48I_1 - 36I_2 + 24 = 0 \qquad (8\text{-}10)$$

La ecuación (8-10) es la ecuación derivada de la ley de tensión de Kirchhoff, para la malla ABCGHIA, reducida a su mínima expresión. Ya es apreciable que sólo quedan dos valores desconocidos.

Con el mismo procedimiento de antes, se determinará ahora la ecuación de la ley de tensión de Kirchhoff para la malla DCGFD. Se comienza en el punto D, y continuando en el sentido de las agujas del reloj, se tendrá que la ecuación para esta malla será:

$$-I_2R_2 - I_5R_5 - I_2R_3 + E_2 = 0 \qquad (8\text{-}11)$$

Según se determinó previamente, el valor de la corriente que circula por la resistencia R_5 es la suma algebraica de I_1 e I_2. Se reemplaza el resultado $I_1 + I_2$ en la ecuación (8-11) y eliminaremos I_5 en la misma:

$$-I_2R_2 - (I_1 + I_2)\ R_5 - I_2R_8 + E_2 = 0 \qquad (0\text{-}12)$$

Para reducir la ecuación (8-12) a su más simple expresión se seguirá el mismo proceso anterior de (8-9):

$$-6I_2 - 36\ (I_1 + I_2) - 6I_2 + 6 = 0$$
$$-6I_2 - 36I_1 - 36I_2 - 6I_2 + 6 = 0$$
$$-36I_1 - 48I_2 + 6 = 0 \qquad (8\text{-}13)$$

La ecuación (8-13) es la aplicación de la ley de Kirchhoff de tensiones para la malla DCGFD reducida a su más simple expresión. Obsérvese que en las ecuaciones de tensión de Kirchhoff para ABCGHIA y DCGFD, hay solamente dos valores de corriente desconocidos.

De acuerdo con la misma ley, la suma algebraica de las corrientes que concurren a un nodo es igual a cero. Como la corriente que entra a un nodo lleva signo (+) y la que sale signo (—), la ecuación para el nodo C será:

$$+I_1 + I_2 - I_5 = 0$$

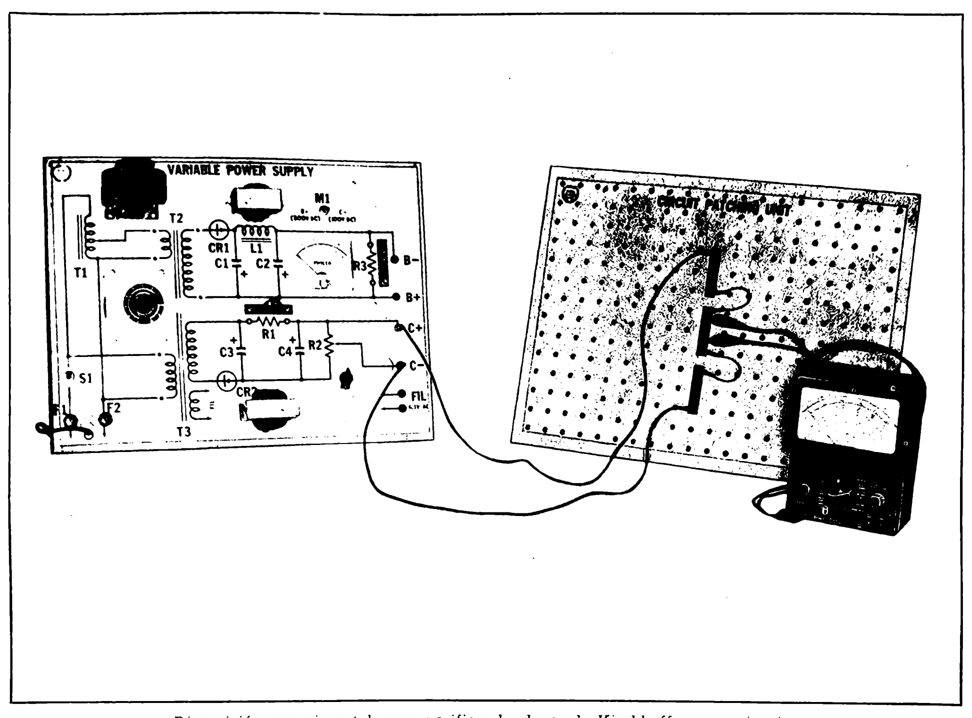
Se transponen términos para eliminar los signos (—):

$$+I_1 + I_2 = I_5;\ \text{o sea:}$$
$$I_5 = I_1 + I_2 \qquad (8\text{-}14)$$

Análogamente, para el nodo G aplicamos la misma ecuación, pues al mismo concurren las tres corrientes precitadas: I_1; I_2; I_5. Luego, el valor de I_5 indicado en la figura 8-6 B se determina mediante la aplicación de la ley de Kirchhoff para corrientes. Para determinar los valores de I_1; I_2 e I_5, es necesario resolver ahora las ecuaciones (8-10) y (8-13) para I_1 e I_2, y la ecuación (8-14) para I_5. Puesto que las dos ecuaciones de tensiones contienen dos valores desconocidos de corriente, para resolverlas es menester eliminar una de las corrientes desconocidas en una de las ecuaciones. Compárese la ecuación (8-10) con la ecuación (8-13).

$$-48I_1 - 36I_2 + 24 = 0$$
$$-36I_1 - 48I_3 + 6 = 0$$

Para eliminar una de las corrientes desconocidas, es necesario multiplicar cada ecuación por un número, que hará al coeficiente de una corriente desconocida en una ecuación, igual al coeficiente de la misma corriente desconocida de la otra ecuación. Las ecuaciones resultantes se sumarán o res-



Disposición experimental, para verificar las leyes de Kirchhoff, en un circuito con dos fuentes de tensión

tarán entonces algebraicamente, de tal manera que se anulen las corrientes que tengan iguales coeficientes.

En este caso se quiere eliminar I_2. El proceso es el siguiente: multiplicar la ecuación (8-10) por 4, como sigue:

$$\begin{array}{r} -48I_1 - 36I_2 + 24 = 0 \\ \times\ 4 \\ \hline -192I_1 - 144I_2 + 96 = 0 \end{array}$$

Multiplíquese la ecuación (8-13) por el número 3, como sigue:

$$\begin{array}{r} -36I_1 - 48I_2 + 6 = 0 \\ \times\ 3 \\ \hline (-)\quad -108I_1 - 144I_2 + 18 = 0 \end{array} \qquad (8\text{-}16)$$

Es importante recordar que todos los términos en las respectivas ecuaciones deben ser multiplicados por el factor elegido si se espera que la relación entre los términos en las distintas ecuaciones se mantenga constante.

Al comparar las ecuaciones (8-15) y (8-16), se nota que en las dos los coeficientes de I_2 son iguales. Cuando se restan algebraicamente estas dos ecuaciones los términos que contienen I_2 se eliminarán mutuamente. La resta algebraica se realiza como sigue:

$$\begin{array}{r} -192I_1 - 144I_2 + 96 = 0 \\ (-)\quad -108I_1 - 144I_2 + 18 = 0 \\ \hline -84I_1 \qquad\qquad + 78 = 0 \end{array} \qquad (8\text{-}17)$$

En la ecuación (8-17), resultado de la sustracción de las ecuaciones (8-15) y (8-16), hay sólo un valor desconocido de corriente, a ser determinado. La ecuación resultante (8-17) resuelta para I_1 será:

$$-84I_1 + 78 = 0$$

$$-84I_1 = -78$$

$$I_1 = \frac{-78}{-84}$$

$$I_1 = 0{,}93 \text{ ampere}$$

Puesto que el valor calculado de corriente es po-

sitivo, indica que el sentido del flujo de la corriente para I_1 es correcta.

Se sustituye el valor calculado de I_1 (0,93 ampere), en la ecuación (8-13), y se determina el valor de I_2 como sigue:

$$-36I_1 - 48I_2 + 6 = 0$$
$$-(36 \times 0,93) - 48I_2 + 6 = 0$$
$$-33,4 - 48I_2 + 6 = 0$$
$$-48I_2 - 27,4 = 0$$
$$-48I_2 = 27,4$$
$$I_2 = \frac{27,4}{-48}$$
$$I_2 = 0,57 \text{ ampere}$$

Puesto que el valor calculado de I_2 está precedido por un signo negativo (—), es incorrecto el sentido elegido del flujo de corriente para I_2, como se ha indicado en la parte B de la figura 8-6. Este valor de corriente, 0,57 ampere, en realidad fluye de la izquierda a la derecha a través de R_2, y de derecha a izquierda a través de R_3. Recuérdese la ley de circuitos paralelos que establece que el flujo de corriente entrante a una unión se divide en proporción a la resistencia de las ramas individuales. Puesto que la corriente de un generador de corriente continua de 24 volt (fuente E_1) entra al punto de unión C, esta corriente se divide en este punto.

La corriente I_2, en consecuencia, es una porción de la corriente I_1 suministrada por el generador y no por la batería de 6 volt (fuente E_2) como se supuso anteriormente. Esto está de acuerdo con la aseveración anterior de que, cuando se conectan fuentes de tensión en serie-opuesta, predomina la fuente más potente y la corriente resultante fluirá en el sentido de la misma.

Para determinar la corriente que fluye por R_5 (I_5), los valores calculados de las corrientes I_1 e I_2 se sustituyen en la ley de Kirchhoff para ecuaciones de corriente en el punto de unión C. Esto se realiza como sigue:

En la ecuación (8-14):

$$I_5 = I_1 + I_2$$

Se sustituyen 0,93 ampere para I_1, y — 0,57 ampere para I_2 y resolviendo para I_5:

$$I_5 = 0,93 + (-0,57)$$
$$I_5 = 0,93 - 0,57$$
$$I_5 = 0,36 \text{ ampere}$$

Con el cálculo de corriente a través de la resistencia R_5, se ha completado el cálculo de todos los valores del circuito. Se sustituyen los valores calculados de I_1 e I_5 en la ecuación (8-8), y procediendo como sigue se demuestra que son correctos:

La ecuación (8-8) de la ley de tensión de Kirchhoff, de la malla cerrada ABCGHIA es:

$$-I_1R_1 - I_5R_5 - I_1R_4 + E_1 = 0$$

Sustituyendo los valores conocidos:

$$-(0,93 \times 4) - (0,36 \times 36) - (0,93 \times 8) + 24 = 0$$

Se eliminan los signos de agrupación y multiplicando resulta:

$$-3,72 - 12,96 - 7,44 + 24 = 0$$
$$-24 + 24 = 0$$
$$0 = 0$$

Para concluir, se ha visto que la ley de tensión de Kirchhoff puede usarse para probar la solución de un problema, así como para resolver los valores desconocidos.

Si se sigue un procedimiento sistemático en la resolución de problemas utilizando las leyes de Kirchhoff, se habrá simplificado la solución de cualquier problema.

8-4 APLICACION DE LOS CIRCUITOS RESISTIVOS

El divisor de tensiones y el circuito puente pueden considerarse como aplicaciones prácticas de los circuitos resistivos. Específicamente, un divisor de tensión es un circuito resistivo conectado a los terminales de salida de una fuente de tensión. La finalidad de tal circuito es dividir la fuente de tensión en tensiones comprendidas entre cero y el valor total de la tensión producida por la fuente. El uso del divisor de tensión elimina la necesidad de colocar varias fuentes de tensión. Los divisores de tensión en circuitos de C.C. están confeccionados con elementos resistivos, mientras que los usados en circuitos de C.A. constan de elementos resistivos, capacitivos o inductivos. Consideraremos solamente, por ahora, los divisores de C.C.

Antes de exponer las características de los mismos, se debe conocer la potencia o energía eléctrica del circuito considerado, para lo cual corresponde estudiarlo.

Potencia eléctrica

Fundamentalmente, la potencia es el ritmo a que se realiza el trabajo. En aplicaciones a circuitos eléctricos, la unidad de potencia es el watt. Un watt de potencia es la requerida para producir un joule de trabajo en un segundo. La potencia eléctrica se expresa más adecuadamente en términos de volt y ampere (watt), antes que en joule por segundo. Luego, en los circuitos eléctricos, *se consume un watt de potencia cuando pasa un ampere entre dos puntos de un circuito que tiene una diferencia de potencial de 1 volt.* En otras palabras, la potencia consumida es el ritmo de liberación de energía, o gasto de la misma, por un aparato o circuito eléctrico. Expresado en forma de ecuación:

$$P = EI \qquad (8\text{-}18)$$

TABLA 8-1. UNIDADES COMUNES DE MEDIDA DE POTENCIA

Unidad	Potencias de la base 10	Watt
Watt (W)		1
Kilowatt (KW)	10^3	1000 (mil)
Megawatt (MW)	10^6	1,000,000 (1 millón)
Miliwatt (mw)	10^{-3}	0.001 (1 milésimo)
Microwatt (μw)	10^{-6}	0.000001 (1 millonésimo)

donde:

P = potencia en watt
E = diferencia de potencial en volt
I = intensidad en ampere

Esta ecuación se puede memorizar así:

Watt = Volt por Ampere

Puesto que el watt puede ser una unidad muy pequeña o muy grande de potencia, según el aparato que se considere, en los circuitos eléctricos se usan generalmente los múltiplos y submúltiplos del watt. Algunos de éstos son: *kilowatt, megawatt, miliwatt* y *microwatt.* La tabla 8-1 da las unidades más usuales de medición de potencias.

Si se observa la ecuación de potencia, se hace evidente que debe conocerse la tensión y la corriente de un circuito (o carga) antes de calcular la potencia. Un método para determinar la corriente y la tensión de una carga es usar amperímetro y voltímetro. Un ejemplo práctico de una carga que consume gran cantidad de energía eléctrica es la plancha eléctrica. Este aparato, conectado en la línea de 110 volt, requiere 8 ampere de corriente. La potencia consumida puede ser determinada así:

$$P = EI$$
$$= 110 \times 8$$
$$P = 880 \text{ watt}$$

Como comparación, los circuitos que forman un equipo electrónico, no consumen tan gran cantidad de potencia. Por ejemplo, una fuente típica de poder de un radiorreceptor puede liberar 300 volt, pero solamente 250 miliampere. La potencia disipada por la carga conectada a esta fuente será:

$$P = 300 \times 250 \times 10^{-3}$$
$$= 75.000 \times 10^{-3} = \frac{75.000}{1000}$$
$$P = 75 \text{ watt}$$

La fórmula básica para calcular la potencia eléctrica, se dispone matemáticamente para resolver el cálculo de tensión o corriente, en base a la potencia, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$P = EI$$
$$E = \frac{P}{I}$$
$$I = \frac{P}{E}$$

Estas ecuaciones muestran las distintas relaciones existentes entre potencia, tensión y corriente. Cuando se conocen dos de ellas, la tercera se puede determinar rápidamente. Sin embargo, como el circuito debe "abrirse" para insertar un amperímetro en serie con la carga y poder medir la corriente del circuito, no siempre es factible utilizar este método para hallar la potencia.

La potencia puede expresarse en términos de resistencia y calcularse sustituyendo las ecuaciones de la ley de Ohm para tensión o corriente en la ecuación básica de la potencia. En consecuencia, puesto que $P = EI$ e $I = \frac{E}{R}$, la ecuación se transforma en:

$$P = EI$$
$$= (E)\frac{(E)}{(R)}$$
$$P = \frac{E^2}{R} \qquad (8\text{-}19)$$

Esta ecuación indica que la potencia consumida por un circuito eléctrico es directamente proporcional al cuadrado de la tensión e inversamente proporcional a la resistencia.

De manera similar, se puede obtener una ecuación de potencia, usando la relación entre corriente y resistencia. En consecuencia, puesto que $E = IR$, la ecuación básica será:

$$P = EI$$
$$= (IR)\,I$$
$$P = I^2R \qquad (8\text{-}20)$$

Nótese que ahora la potencia es igual a la corriente al cuadrado multiplicada por la resistencia. Como consecuencia de la íntima relación entre las cantidades de potencia, tensión, corriente y resistencia, es evidente que cuando se conocen dos cualesquiera de las mismas, pueden determinarse las otras. Los problemas siguientes, una vez resueltos, servirán para ilustrar las aplicaciones de las diversas ecuaciones de potencia.

1er. Problema: un resistor consume 20 watt de potencia cuando se conecta a una fuente

de 20 volt. Hállese el valor de resistencia en el circuito, y la cantidad de flujo de corriente del resistor.

2do. Problema: calcúlese la potencia de una bombilla de luz de 120 volt, que tiene una resistencia de 114 ohm. Asimismo, calcúlese el valor de la corriente que fluye por la bombilla.

3er. Problema: ¿Cuál es la resistencia y el flujo de corriente de un elemento calefactor de una plancha eléctrica que funciona con 120 volt y consume 1.000 watt?

Pérdidas de potencia

La pérdida de potencia más común en un equipo electrónico o eléctrico es la pérdida en forma de calor cuando fluye la corriente por la resistencia del circuito. Esta pérdida a menudo se llama pérdida I^2R o *pérdida en el cobre* y está siempre presente cuando fluye la corriente. El calor generalmente se disipa en el aire y se pierde; en consecuencia, a menudo se usan los términos *disipación de calor* o *disipación de potencia* para referirse a la pérdida de potencia de un circuito. En algunos casos la disipación de calor puede aprovecharse como en el caso de la estufa eléctrica, tostadora, soldador o el filamento de una válvula.

Las pérdidas de potencia en los resistores son un factor importante en un equipo electrónico. Un resistor consume potencia de acuerdo con la tensión aplicada y con la corriente que fluye por la misma. Esto es una pérdida de potencia, puesto que el calor producido por el resistor es, en la mayoría de los circuitos, de valor práctico nulo.

Se usan muchos tipos diferentes de resistores para los diversos requerimientos de los circuitos eléctricos y electrónicos. Debido a estas distintas aplicaciones de los circuitos, los alcances de los resistores varían de un cuarto de watt (¼ W), en resistencias pequeñas, a aproximadamente 250 watt en los resistores más grandes. Los resistores que tienen alcances de potencia de 2 watt o menos, son generalmente del tipo de composición fija, de carbón pulverizado mezclado con un material de liga. Para potencias mayores de 2 watt, los resistores usados son generalmente del tipo de alambre arrollado construidas arrollando una bobina de alambre alrededor de un aislador. Tales resistores son a menudo arrolladas de modo que no tengan inductancia (arrollamientos no inductivos, capítulo 9).

Es muy importante conocer el valor de la potencia que un resistor dado disipará en un circuito, para hacer reparaciones adecuadas en el mismo. Si un resistor de reemplazo no puede disipar con seguridad la potencia requerida, se recalienta y posiblemente se quema, y el calor que irradiará puede estropear otras partes componentes del equipo. Por esta razón es muy importante reemplazar un resistor en un equipo con otro de potencia adecuada (igual o mayor al que se reemplaza). Cuando se usa un resistor en un circuito, su potencia disipada no debe ser excedida. Para reducir la posibilidad de que un resistor se recaliente y queme, debe aplicarse un factor de seguridad del 100 % cuando se las selecciona para un circuito. Por ejemplo, si la disipación máxima de potencia calculada para un resistor de un circuito es 10 watt, se debe utilizar un resistor de 20 watt. La relación de potencia de un resistor, indica la potencia que irradiará el mismo, en forma de calor cedido al ambiente. Los resistores colocados bajo el chasis en los equipos electrónicos, en algunos casos producen desperfectos por sobrecalentamiento, debido al poco espacio para la radiación de calor. Para prevenir este inconveniente, muchos aparatos eléctricos se ventilan mediante ventiladores que enfrían los elementos.

Energía eléctrica

Puesto que la potencia es el ritmo de producción de trabajo, se deduce que cuanto mayor es el intervalo de tiempo durante el cual la potencia se disipa, mayor será la energía total consumida. La cantidad de energía suministrada por una batería u otra fuente de C.C. a un circuito resistivo, en un intervalo de tiempo dado, se llama *energía eléctrica.*

Aunque la energía eléctrica se mide generalmente en *watt-hora* (potencia en watt multiplicada por tiempo en horas) y *Kilowatt-hora* (potencia en Kilowatt multiplicada por tiempo en horas), se pueden utilizar unidades más pequeñas de potencia y tiempo, como el watt-segundo, para medir pequeños valores de energía eléctrica. Para calcular el consumo de energía de un circuito resistivo en watt-hora, se utiliza la siguiente ecuación:

$$Wh = EIt \qquad (8\text{-}21)$$

donde:

Wh = watt-hora
E = tensión aplicada, en volt
I = Intensidad, en ampere
t = intervalo de tiempo de aplicación de la tensión, en horas

Por ejemplo, si una batería de 6 volt suministra una corriente de 50 ampere durante 4 horas, la energía producida será:

$$Wh = EIt$$
$$Wh = 6 \times 50 \times 4$$
$$Wh = 1.200 \text{ watt-hora}$$

El valor 1.200 watt-hora indica que la batería puede producir 1.200 watt de potencia durante un período de una hora.

En lo estudiado sobre baterías, se estableció que la cantidad de energía eléctrica en una batería con carga máxima se mide en ampere-hora. De acuerdo con la definición estricta de energía eléctrica, el ampere-hora no es una unidad de energía. Hay, no obstante, una relación definida entre la energía producida por una batería, y los ampere-hora que circulan por el circuito alimentado por la misma. Los ampere-hora producidos indican nada más que su capacidad de liberar una cantidad determinada de corriente, no potencia, para un cierto período de tiempo. Para convertir los ampere-hora de una batería en energía eléctrica, es necesario multiplicar los ampere-hora por la tensión de los terminales de la batería.

En el ejemplo anterior, suponiendo que la producción de la batería sea de 200 ampere-hora, calcular la energía eléctrica de la batería. Se tendrá:

$$Wh = \text{ampere-hora por tensión de salida}$$
$$= 200 \times 6 = 1.200$$
$$Wh = 1.200 \text{ watt-hora}$$

Cuando se trabaja con una gran cantidad de energía eléctrica, se utiliza comúnmente el kilowatt-hora en vez del watt-hora. La ecuación utilizada para determinar la energía eléctrica en kilowatt-hora (KWh) es:

$$KWh = \frac{EIt}{1000}$$

donde todos los factores fueron definidos con anterioridad.

Divisores de tensión

Un divisor de tensión es un circuito resistivo que puede conectarse a los terminales de una fuente de f.e.m. Su finalidad es dividir la tensión de la fuente en varias magnitudes parciales para distintas aplicaciones. Los divisores de tensión con resistores fijos se utilizan frecuentemente en electrónica para el suministro de energía. Para tales usos, una tensión elevada de C.C. se aplica a varios resistores fijos, o a resistores con varias derivaciones ajustables, conectadas en serie.

Las tensiones desarrolladas a través de las resitencias en serie se emplean como fuentes de tensión de placa, tensión de grilla, y tensión de polarización de grilla, para las válvulas del equipo electrónico, en lugar de emplear para cada tensión necesaria, una fuente independiente. Los divisores de tensión a potenciómetro o reóstato, llamados divisores de tensión graduables, se usan en aplicaciones tales como controles de tono y volumen de radiorreceptores, y controles de brillo y contraste en receptores de televisión.

Divisores de tensión elementales (funcionamiento sin carga)

Cuando las tensiones de salida de un divisor de tensión no están aplicadas a una carga, no hay flujo de corriente a través de los terminales de salida. En este caso, el divisor de tensión funciona "*sin carga*", y sus tensiones de salida se determinan mediante los valores de la tensión de la fuente y el valor proporcional de las resistencias del divisor.

En la figura 8-7 puede verse la forma más sencilla de divisor de tensión, llamada "divisor de tensión de dos elementos". La fuente de tensión es, en este caso, una batería, con las tensiones de salida del divisor tomadas a través de cada resistor. Para determinar los factores que afectan la salida del divisor, las tensiones de salida (E_{01} y E_{02}) pueden obtenerse en función de la tensión de la fuente (E) y de las resistencias R_1 y R_2.

Hay dos métodos de resolver este sencillo circuito divisor. Un método está basado en las leyes de Kirchhoff; el otro, en la ley de Ohm. En el último método se establece una sola ecuación para resolver directamente las tensiones de salida a través de las resistencias individuales. La deducción de esta simple ecuación de la ley de Ohm es como sigue:

Primeramente, la ecuación para determinar la corriente en el circuito es:

$$I_t = \frac{E}{R_t}$$

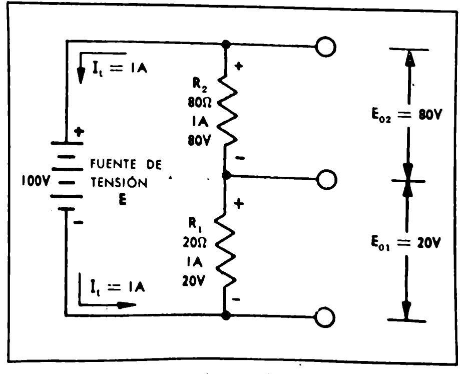


Figura 8-7. Divisor de tensión de dos elementos

y la ecuación para determinar el valor de la salida de tensión a través de R_1 (E_{01}) es:

$$E_{01} = I_t R_1$$

como:

$$I_t = \frac{E}{R_t}$$

la ecuación precedente puede ser expresada:

$$E_{01} = \frac{E}{R_t} R_1$$

y ahora, como $R_t = R_1 + R_2$, la ecuación resulta:

$$E_{01} = E \frac{(R_1)}{(R_1 + R_2)} \qquad (8\text{-}22)$$

Para entender el uso de esta ecuación, véase la figura 8-7 y usando los valores indicados, determínese la tensión de salida de R_1

$$E_{01} = E \frac{(R_1)}{(R_1 + R_2)}$$
$$= 100 \frac{20}{(20 + 80)}$$
$$= 100 \frac{20}{(100)}$$
$$= 100 \times 0{,}2$$
$$E_{01} = 20 \text{ volt}$$

La tensión de salida a través de R_2 (E_{02}) puede determinarse de manera similar. Es evidente que sin tener en cuenta el método usado, el resultado será el mismo. En realidad, el paso para la resolución está incluido en la ecuación (8-22), en forma de relación entre la fuente de poder (E) y la resistencia total del circuito $(R_1 + R_2)$.

Los métodos usados para calcular la tensión de salida de un divisor de tensión de dos elementos sin carga, pueden usarse también para calcular las tensiones de salida de divisores de tres o más elementos.

Manejo del divisor de tensión con carga

El divisor de tensión recién analizado fue considerado "sin carga", es decir que no había resistencia externa conectada a las salidas individuales. En tales tipos de divisores, la corriente total del circuito se determina por las resistencias del divisor de tensión mismo. Sin embargo, puesto que el propósito de un divisor de tensión es proveer una tensión a un circuito externo, al efecto del circuito externo (carga) sobre el divisor de tensión debe tenerse en cuenta en aplicaciones prácticas de los circuitos. Cuando la salida de tensión del divisor se aplica a un circuito externo, este circuito absorberá corriente del divisor y cambia, en consecuencia, la tensión de salida. La tensión de salida de un divisor de tensión con carga, depende, entonces, de la corriente que fluye por la resistencia del divisor y de la resistencia de la carga.

Para estudiar el efecto que una carga tiene sobre un divisor de tensión, considérese el diagrama del circuito mostrado en la parte A de la figura 8-8. Este circuito es el mismo que se muestra en la figura 8-7 con la excepción que la carga, resistor R_L, ahora está conectada entre los terminales de salida a través de R_1. Suponiendo que la llave S_1 esté en posición 1, la corriente total del circuito será la determinada previamente. Asimismo, el flujo de corriente a través de R_1 y R_2 será igual a la corriente del circuito descargado.

Sin embargo, cuando se cierra la llave S_1 (po-

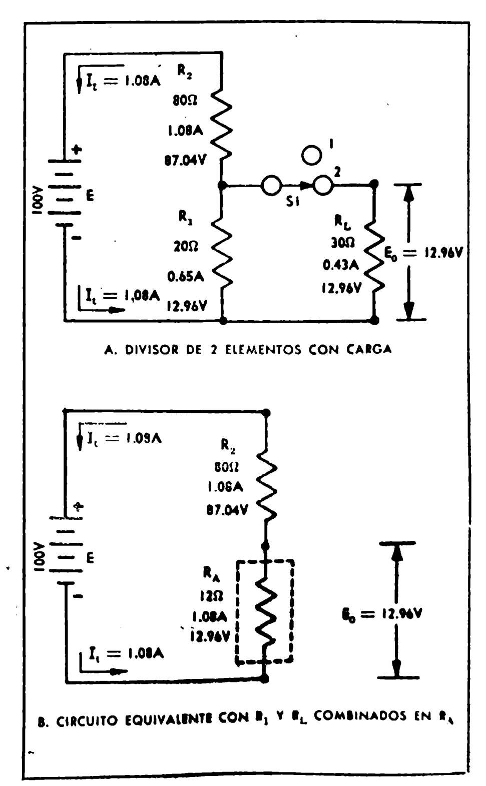


Figura 8-8. Divisor de tensión de dos elementos cargados y circuito equivalente que combina R_1 y R_L en R_A

sición 2), el resistor de carga R_L queda colocada en paralelo con el resistor R_1. Al recordar las características de los circuitos paralelos, el valor equivalente de las resistencias en paralelo es siempre menor que la resistencia más pequeña de una rama del circuito. Será necesario recordar que la corriente total del circuito se divide circulando por cada rama en cantidad proporcional a la resistencia de la misma. Es evidente, por lo tanto, que la tensión de salida y la corriente total del circuito del divisor cargado diferirá de la del divisor descargado. Obsérvese que el circuito de la figura 8-8 A es una combinación en serie-paralelo. Antes de poder determinar la tensión de salida a través de la malla de paralelo (E_o) es necesario determinar primero la resistencia equivalente (R_A) de la malla, y luego calcular la corriente (I_t) del circuito. El valor de la resistencia equivalente R_A se determina mediante el método "producto sobre suma":

$$R_A = \frac{R_1 \times R_L}{R_1 + R_L} = \frac{20 \times 30}{20 + 30} = \frac{600}{50}$$

$$R_A = 12 \text{ ohm.}$$

Este valor de resistencia ($R_A = 12$ ohm), se puede observar en el circuito equivalente de la figura 8-8 B.

Ahora que se ha derivado el circuito en serie-paralelo hasta obtener un sencillo circuito en serie, todos los valores de corriente y tensión pueden hallarse según se indica en la parte B de la figura. Obsérvese que la corriente total del circuito ha aumentado, y la tensión de salida (E_{01}) ha disminuido con respecto a la condición de sin carga, como cuando S_1 está abierta o como se ve en la fig. 8-7. Esta condición existirá siempre en circuitos divisores de tensión con carga, que tengan una resistencia de carga igual o casi igual a la del divisor al cual se conecta la carga.

Si la carga aplicada a un divisor de tensión fuera mucho mayor en resistencia que la de éste, la resistencia equivalente se aproximaría a la resistencia del divisor, y el divisor de tensión funcionará efectivamente en la condición de sin carga. Por regla general, esta condición dada es suficientemente exacta, cuando la resistencia de carga R_L es 10 o más veces más grande que la resistencia del divisor a la cual está conectada. Esta aseveración puede probarse resolviendo I_T y E_0, si se supone que R_L de la figura 8-8 A ofrece una resistencia de 200 ohm.

De los dos sencillos ejemplos precedentes de circuitos divisores de tensión, resulta evidente que pueden determinarse, mediante la adecuada aplicación de la ley de Ohm, la tensión de salida y las corrientes de las ramas de dichos divisores. Se puede aplicar el mismo procedimiento para calcular la resistencia efectiva, tensión de salida y corriente total, en un circuito malla, sin preocupación por el número de resistencias que lo compongan.

Divisor de tensión de uso práctico

Los divisores de tensión que se usan comúnmente en las etapas de alimentación de energía en los equipos electrónicos, usan generalmente resistores de un valor de miles de ohm, en lugar de los valores relativamente bajos usados en los ejemplos recién presentados. Asimismo, los valores de corriente del divisor sin carga, y las ramas de un divisor con carga, son del orden de miliampere, en lugar de ampere. El circuito mostrado en la parte A de la figura 8-9 es típico del tipo de circuito divisor de tensión que encontraremos en los equipos electrónicos.

El uso de un punto de referencia común, tierra, es una práctica común en los modernos equipos electrónicos. Mediante dicho punto, generalmente el chasis del equipo, los diversos circuitos que componen el equipo, no tienen que ser conectados al divisor de tensión con largas tiras de alambre con el fin de interconectar los circuitos a través del divisor de tensión. Asimismo, si una fuente de poder se conecta de manera que ninguna parte del sistema vaya a tierra, el divisor de tensión puede ser conectado a tierra en cualquier punto (puntos D, C, B o A), sin afectar el funcionamiento de la fuente de poder. En tales casos, la fuente de energía proveerá a los circuitos del equipo tensiones negativas (—) y positivas (+), con respecto a tierra.

Funcionamiento sin carga

Considérese nuevamente el divisor de tensión de la parte A de la figura 8-9. Este circuito proveerá las tensiones positivas en los puntos C, B y A, con referencia a la tierra que está en el punto D. En consecuencia, la tensión de salida E_{01} será la tensión positiva desarrollada a través de R_1; la tensión de salida E_{02} será la tensión positiva desarrollada a través de las resistencias conectadas en serie, R_1 y R_2; y la tensión de salida E_{03} será la tensión positiva desarrollada a través de las resistencias combinadas en serie R_1, R_2 y R_3. De la figura se puede ver que con 370 volt aplicados a través de la malla en serie, con el mismo

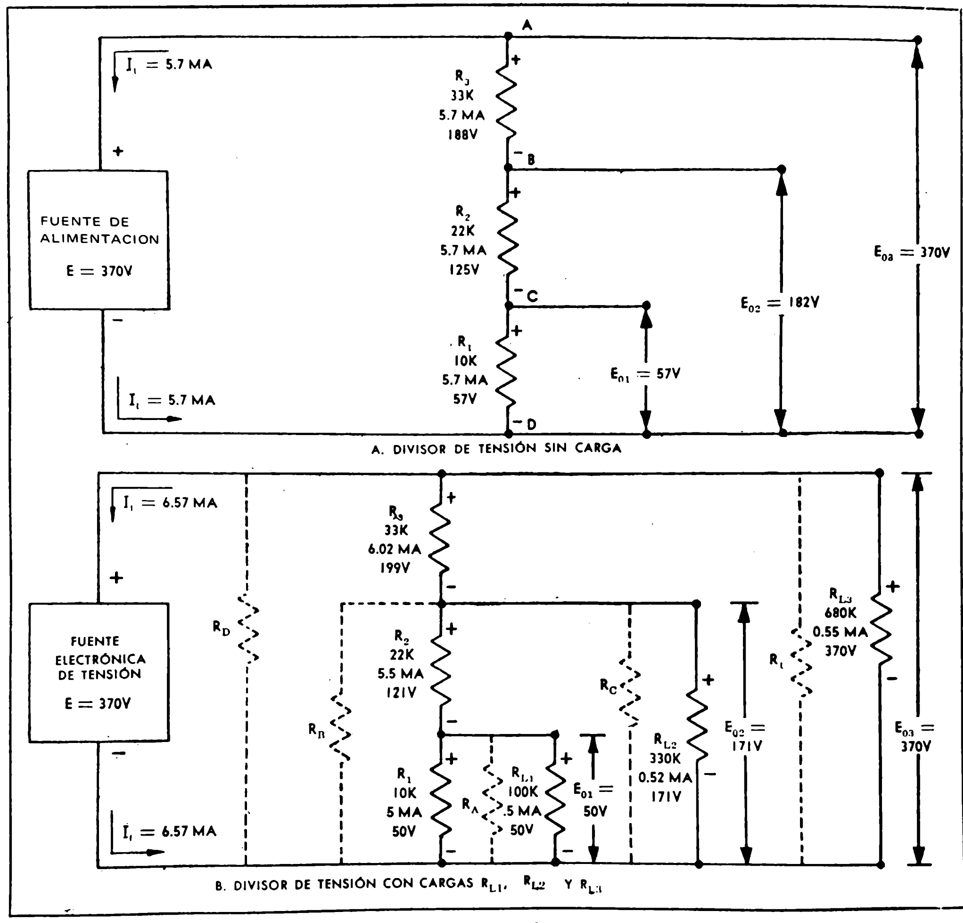


Figura 8-9. Divisor de tensión con y sin carga

valor anterior de cada una de las resistencias, la corriente a través del circuito será de 5,7 ma. En consecuencia, por medio del uso de la ley de Ohm se encuentra que E_{01}, E_{02} y E_{03} tienen los siguientes valores: 57, 182 y 370 volt respectivamente.

Funcionamiento con carga

El funcionamiento del divisor de tensión con carga, de la parte B de la figura 8-9, es muy similar al funcionamiento del divisor de tensión cargado de dos elementos. Las tensiones de salida y corrientes de las ramas se encuentran usando los mismos métodos que se usaron anteriormente. El examen del circuito revela que la carga R_{L3} se coloca directamente a través de los terminales de la fuente de poder. En consecuencia, la tensión a través de esta carga será de 370 volt. Para determinar la corriente y la tensión a través de las otras dos cargas, se deberá utilizar el siguiente procedimiento, partiendo de la base de que sólo se conocen la fuente de tensión y la resistencia

1º) Determinar el valor efectivo de la resistencia (R_A) del circuito paralelo de R_1 y R_{L1}.

$$R_A = \frac{R_1 \times R_{L1}}{R_1 + R_{L1}}$$

$R_A = 9{,}090$ ohm (redondeando, R_A se convierte en 9,1 K).

Nótese en la parte B de la figura 8-9 que R_A es la resistencia a través de la cual se ejerce la tensión de salida E_{01}.

2º) Determinar el valor efectivo de resistencia (R_B) del circuito en serie R_A y R_2.

$$R_B = R_A + R_2$$
$$R_B = 31{,}1 \text{ K}$$

3º) Determinar el valor efectivo de resistencia (R_c) del circuito en paralelo R_B y R_{L2}.

$$R_c = \frac{R_B + R_{L2}}{R_B \times R_{L2}}$$
$$R_c = 28{,}4 \text{ K}$$

Nótese en la figura que R_c es la resistencia a través de la cual se ejerce la tensión de salida E_{02}.

4º) Encuéntrese la resistencia equivalente (R_D) del circuito en serie $R_c + R_3$.

$$R_D = R_c + R_3$$
$$R_D = 61{,}4 \text{ K}$$

5º) Encuéntrese la resistencia total (R_t), la cual es R_d en paralelo con R_{L3}.

$$R_t = \frac{R_D \times R_{L3}}{R_D + R_{L3}}$$
$$R_t = 56{,}3 \text{ K}$$

6º) Determinar la corriente total del circuito

$$I_t = \frac{E_{03}}{R_t}$$
$$I_t = 6{,}57 \text{ miliampere}$$

7º) Calcular la corriente que circula a través de R_{L3}.

$$I_{RL3} = \frac{E_{03}}{R_{L3}}$$
$$I_{RL3} = 0{,}55 \text{ miliampere}$$

8º) Determinar el valor de corriente que circula por R_3

$$I_{R3} = I_t - I_{RL3}$$
$$I_{R3} = 6{,}02 \text{ miliampere}$$

9º) Encuéntrese el valor de la tensión de E_{02}

$$E_{02} = I_{R3} \times R_c$$
$$E_{02} = 171 \text{ volt}$$

10º) Calcúlese el valor de corriente de R_{L2}

$$I_{RL2} = \frac{E_{02}}{R_{L2}}$$
$$I_{RL2} = 0{,}52 \text{ ma}$$

11º) Determinar el valor de corriente de R_2

$$I_{R2} = I_{R3} - I_{RL2}$$
$$I_{R2} = 5{,}5 \text{ ma}$$

12º) Encuéntrese el valor de la tensión E_{01}

$$E_{01} = E_{01} = I_{R2} \cdot R_A$$
$$E_{01} = 50 \text{ volt}$$

13º) Calcular el valor de la corriente a través de R_{L1}

$$I_{RL1} = \frac{E_{01}}{R_{L1}}$$
$$I_{RL1} = 0{,}5 \text{ miliampere}$$

El procedimiento aplicado puede modificarse para resolver E_{01}, E_{02} e I_t, pero igualmente servirá para ilustrar sobre la necesidad de un procedimiento lógico para determinar los valores de tensión.

En resumen, las conclusiones a que hemos llegado son: la tensión de salida y la corriente total del circuito son diferentes en los divisores cargados y sin carga. Esto quiere decir que los valores de la corriente y la tensión de salida dependen de los valores de la carga de resistencia y de la resistencia del divisor a través del cual se obtiene la tensión para la carga. La corriente total del circuito en el divisor de tensión con carga será mayor que aquélla con circuito sin carga, por cuanto la tensión de salida del circuito cargado es menor que aquélla del circuito sin carga.

Regulación de la tensión de los divisores

Se ha demostrado que la tensión de salida de un divisor con carga se diferencia de aquél que no la tiene. El cambio de la tensión de salida entre las condiciones de carga y no carga de un divisor de tensión, expresado como un porcentaje de la tensión de carga, se llama *regulación de tensión del divisor*. Como expresión matemática, la regulación de tensión se expresa por la ecuación:

$$\% \text{ de regulación} = \frac{E_{NL} - E_L}{E_L} \times 100 \quad (8\text{-}23)$$

donde:

E_{NL} = tensión sin carga del divisor, en volt
E_L = tensión con carga del divisor, en volt

Mediante el uso del porcentaje de regulación de tensión de un circuito, es posible comparar los méritos relativos de los sistemas de dos o más divisores de tensión. El mejor sistema será siem-

pre aquél que tenga la menor regulación de tensión, y en consecuencia, el cambio de tensión entre las condiciones de con carga y sin carga será muy pequeño. Se puede calcular la regulación de tensión para las tensiones de salida de E_{01}, E_{02} y E_{03}, para los circuitos de divisores recién estudiados. La tensión de salida de E_{01} es 57 volt, y su valor con carga es 50 volt. Se sustituyen estos valores en la ecuación de regulación de tensión, y se tendrá:

$$\% \text{ de regulación } E_{01} = \frac{E_{NL} - E_L}{E_L} \times 100$$

$$= \frac{57 - 50}{50} \times 100$$

$$= \frac{7}{50} \times 100$$

$$\% \text{ de regulación } E_{01} = 0{,}14 \times 100 = 14\ \%$$

La tensión sin carga para E_{01} es 182 volt, mientras que la tensión con carga para esta salida es de 171 volt. Se sustituyen estos valores en la ecuación, y el porcentaje de tensión regulada para E_{02} resulta ser 6,4 %. Puesto que la tensión de salida E_{03} es la misma para las condiciones con carga y sin carga, el porcentaje de regulación de tensión es cero. Al comparar los valores de porcentajes de la regulación de tensión para los divisores calculados, es evidente que el divisor de tensión que tiene mayor carga tendrá el mejor porcentaje de regulación de tensión. Esto está de acuerdo con la aseveración hecha anteriormente: cuando la resistencia de una carga se hace 10 o más veces la resistencia del divisor a través del cual se ha tomado la tensión de salida, esta última se aproximará a la tensión de la fuente.

Régimen de potencia de un divisor de tensión

De lo estudiado anteriormente sobre potencia y energía en los circuitos eléctricos, se comprobó que se disipará potencia en forma de calor cada vez que fluya una corriente a través de una resistencia. La ecuación usada para determinar la capacidad de potencia de un resistor es:

$$P = 2\ (I^2R)$$

El 2 es un factor numérico para indicar un ciento por ciento de seguridad cuando se selecciona el valor de potencia a utilizar en la práctica; los otros parámetros (P, I y R) son los descritos anteriormente.

Cuando un divisor de tensión consiste en varios resistores individuales, el valor de la potencia se calcula separadamente. Es decir que el cálculo de potencia de cada resistor se determina para cada valor individual y para la corriente que por ella fluye. Después de calcular el requerimiento de potencia de cada resistor en un divisor de tensión se deberá seleccionar el resistencia de la potencia, más próxima a los valores normales de fabricación. Como ejemplo: si la potencia calculada de una resistencia es 21,5 watt, se deberá usar en el circuito un resistor de 25 watt.

Divisores variables de tensión

Los divisores de tensión pueden constar de un resistor variable o también de varios en serie, con valor fijo individual. El divisor variable de tensión puede usar un potenciómetro o un reóstato como elemento variable. Aunque los muchos tipos de reóstatos y potenciómetros difieren en su construcción, en lo fundamental su funcionamiento es muy similar. El movimiento deslizante se realiza a lo largo de un valor de resistencia dado; en consecuencia, permite regular la tensión desarrollada a través de la resistencia para aplicar a un circuito deseado.

El elemento resistivo de un resistor variable puede ser de carbón o alambre de resistencia. Cada uno de estos materiales tiene sus ventajas y desventajas. El tipo de resistencia de carbón tiene una capacidad limitada de conducción de corriente, y no puede funcionar eficientemente para valores menores de 500 ohm. Sin embargo, la resistencia de carbón está relativamente *libre de ruido*, y se pueden obtener fácilmente amplios valores de resistencia (más de 20 megohm). La resistencia de alambre, o resistencia variable de alambre arrollado, produce ruido debido al arco formado entre las espiras y además es de limitada capacidad de resistencia, como consecuencia de la longitud necesaria de alambre para valores muy grandes. Un resistor de alambre puede utilizarse para grandes corrientes y también puede fabricarse con valores más precisos que el de carbón.

Variación de los valores en los resistores variables.

Además de diferir en el material usado en su construcción, los resistores también difieren en su graduación. En algunos resistores variables, la resistencia varía en proporción directa con la rotación del eje (variación lineal), mientras que en otros, la resistencia no está directamente relacionada con la rotación (variación no lineal).

En el tipo de variación lineal, el valor de la resistencia varía directamente con el grado de rotación del eje rotativo. Es decir que con una media vuelta, el valor de resistencia es igual a la mitad del total; en forma similar, con tres cuartos de vuelta, el valor de resistencia es de tres cuartas partes del total. En consecuencia, el por-

centaje de tensión graduado variará a un ritmo constante cuando el contacto central se mueve o gira de un extremo del control al otro. Los controles lineales se aplican donde se desea tener un cambio uniforme de tensión. Los controles de la figura 8-10 muestran la construcción de los resistores de carbón y de alambre. Nótese que en ambos casos la densidad del elemento resistivo es uniforme.

Los resistores variables que no cambian su valor en proporción directa con el grado de rotación del eje central, son llamadas controles no lineales. Los resistores variables usados para controlar ciertas cantidades deben graduarse para obtener un cambio *uniforme aparente* de la cantidad controlada. Como ejemplo considérese el control de volumen de una radio. Normalmente, cuando el control de volumen gira hasta la mitad del total, generalmente se espera que este nivel será la mitad del obtenido efectuando una rotación hasta el tope. Sin embargo, la relación existente entre un aumento de tensión y el aumento de volumen producido no es lineal, y se tendrá que usar un control graduado para producir un cambio uniforme aparente del volumen de sonido.

En la figura 8-11 se ven dos ejemplos de resistores variables de carbón no lineales. Nótese que la densidad del elemento resistivo en estos controles no es uniforme; como consecuencia, la resistencia del control varía en un ritmo no lineal. En la superficie donde el carbón es más denso, la resistencia del elemento es más baja que en las zonas menos densas. La densidad del elemento resistivo en la parte A de la figura 8-11, es mayor del lado izquierdo del control. El lado izquierdo, en consecuencia, tendrá, como se ha indicado, un valor de resistencia menor que el lado derecho. Por lo tanto, la resistencia del lado izquierdo del control llega a cero y se dice del control que tiene una resistencia a izquierda igual a cero.

El resistor variable que se muestra en la parte B de la figura 8-11, tiene un valor a la derecha igual a cero, puesto que el lado derecho de este control tiene una resistencia nula. Es evidente, en consecuencia, que la resistencia a cero de derecha a izquierda de un control está determinada por el lado que tiene el menor valor de resistencia.

Los controles no lineales pueden ser de carbón o de alambre. Los controles no lineales de alambre se constituyen arrollando el alambre de resistencia de tal manera que la resistencia no aumentará ni disminuirá a un ritmo constante mientras se mueve el contacto de una punta a la otra.

En la figura 8-12 se ven dos ejemplos de resistores variables de alambre, no lineales. Nótese en la parte A de la figura 8-12, que el alambre del lado izquierdo es mucho más grueso que el del lado derecho, y su resistencia es mucho menor que la de los alambres más finos del lado derecho. La

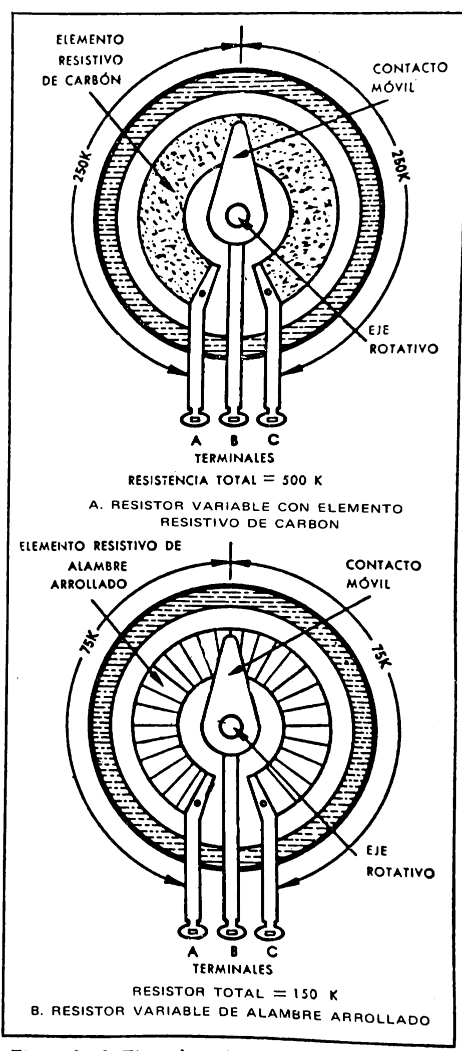


Figura 8-10. Tipos de resistores de variación lineal

resistividad de un alambre cambia con su diámetro; un diámetro menor permite arrollar una mayor cantidad de resistencia en una superficie dada y, en consecuencia, aumentar la resistencia. Encontramos aplicaciones de estas resistencias de alambres variables, no lineales, en circuitos reguladores de altas corrientes, donde el requerimiento primordial es un control uniforme.

Potenciómetro usado como divisor de tensión

Podemos describir a un potenciómetro, como una resistencia variable, conectada a un circuito de manera tal que divide la tensión del mismo. La tensión es dividida por un cursor graduable, cuya posición es controlada por un eje rotativo.

La parte A de la figura 8-13 muestra las co-

ELEMENTO DE CARBON
50K
450K
A B C
TERMINALES
RESISTENCIA TOTAL = 500 K
A. DERIVACIÓN A LA IZQUIERDA

ELEMENTO DE CARBÓN
450K
50K
A B C
TERMINALES
RESISTENCIA TOTAL = 500 K
B DERIVACIÓN A LA DERECHA

Figura 8-11. Resistores variables no lineales de carbón

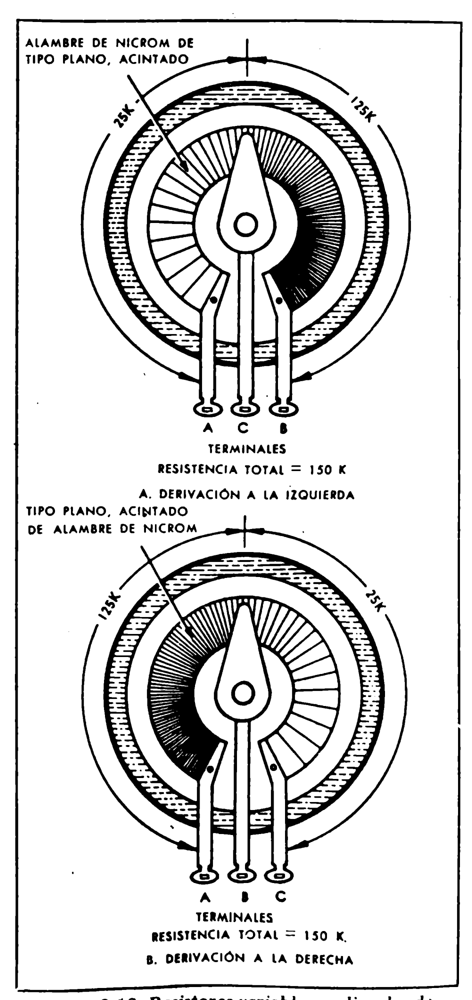


Figura 8-12. Resistores variables no lineales de alambre

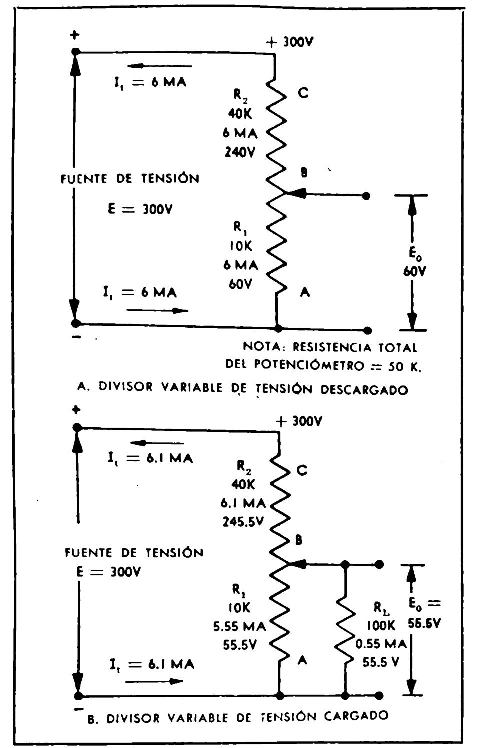


Figura 8-13. Divisor variable de tensión cargado y descargado

nexiones del diagrama del circuito de un divisor de tensión variable sin carga. Si se varía la posición del contacto deslizante (B), es posible obtener cualquier valor de tensión de salida a través del potenciómetro, desde un punto cero a la máxima tensión en el punto C. El método usado para determinar la tensión de salida de este divisor de tensión sin carga, es el mismo que se usa para el divisor fijo sin carga de dos elementos. Si se supone que el contacto deslizante sea como el que indica la figura, la tensión de salida (E_0), entre el contacto deslizante y el punto A, ha sido calculado en 60 volt. Si el divisor variable de tensión fuera conectado a una carga de circuito de 100 kilohm, como se indica en la parte B de la figura, la tensión de salida resultante sería disminuida a 55,5 volt.

El valor de la potencia de un divisor variable de tensión se determina utilizando el método *normal* de cálculo. Es decir, puesto que un divisor variable de tensión es similar a un resistor con derivación, el valor de la potencia de la totalidad del elemento se determina por la resistencia del potenciómetro y la máxima corriente que fluye por el mismo. Con los valores indicados en la parte B de la figura 8-13, el alcance de potencia del potenciómetro usado en este circuito sería de 3,7 watt. Puesto que los potenciómetros se fabrican en valores normales de potencia, es aconsejable utilizar uno de 5 watt, que es uno de los valores normalizados por los fabricantes.

Reóstato utilizado como divisor de tensión

El manejo de un reóstato es muy similar al del potenciómetro, puesto que, como este último, su resistencia se varía por medio de un cursor, controlado por un eje giratorio. Aunque los reóstatos pueden usarse como divisores variables de tensión, se los usa principalmente como limitadores de corriente a través de una carga.

La figura 8-14 muestra el diagrama del circuito de un reóstato conectado en serie con una carga. Nótese que las conexiones están hechas sólo en dos terminales del reóstato, mientras que en un potenciómetro se hacen las conexiones en tres terminales. Cuando el cursor (B) del reóstato gira hacia el terminal (C), la resistencia A-B aumenta. Con un aumento de la resistencia del reóstato, la caída de tensión a través del mismo también aumenta y, en consecuencia, la tensión obtenible en la carga (R_L) y la corriente circulante en la carga disminuyen. De la misma forma, cuando se mueve el contacto deslizante del reóstato hacia el terminal A, disminuye la resistencia en la porción A-B de la unidad. Con una disminución en la resistencia del reóstato, la caída de tensión a través del mis-

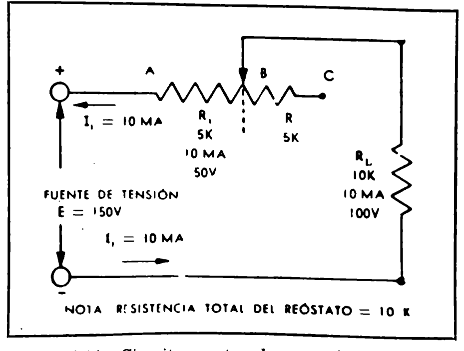


Figura 8-14. Circuito mostrando un reóstato en serie

mo también decrece; en consecuencia, aumentan la tensión obtenible con la carga y la corriente por la misma.

El alcance de potencia de un reóstato conectado en serie, se determina por la resistencia de la totalidad de la unidad y el máximo valor de flujo de corriente esperado en el circuito.

En suma, hay dos tipos de divisores variables de tensión: el potenciómetro y el reóstato. Estos controles pueden ser construidos usando un elemento resistivo de carbón, que también puede ser de alambre. La resistencia de los controles variables puede hacerse para variar linealmente o no linealmente con la rotación del eje. Los controles no lineales se llaman a menudo controles de mano derecha o izquierda, dependiendo de qué lado está el menor valor de resistencia.

Circuitos puente

Un tipo de circuito utilizado en los equipos electrónicos es el llamado *circuito puente*. Estos circuitos encuentran aplicaciones específicas en instrumentos de prueba y medición, y también en osciladores altamente estables. El circuito puente es una forma de divisor de tensión, y puede ser analizado de una manera similar a éste. El circuito básico puente utilizado en los instrumentos de medición consiste en tres resistencias conocidas, un galvanómetro de indicación central, una fuente de tensión y una resistencia desconocida. Aunque una, dos o tres de las resistencias pueden convertirse en variables, generalmente esto se hace sólo con una o dos, dejando las otras con un valor fijo conocido. En algunos circuitos en puente dos de las resistencias conocidas son reemplazadas por un alambre nicrom con resistencia calibrada. Este circuito, llamado puente de alambre deslizante, funciona de la misma manera que el circuito puente fundamental.

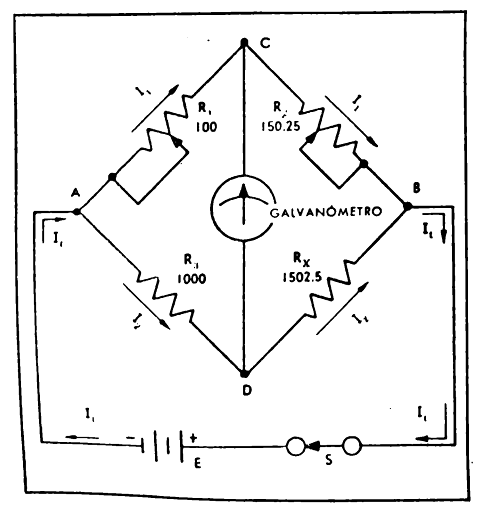


Figura 8-15. Circuito del *puente de Wheatstone*

Puente de Wheatstone

Puente de Wheatstone es el nombre dado a un circuito especial que provee un método muy preciso para obtener el valor de una resistencia desconocida. La figura 8-15 es un diagrama del circuito del puente de Wheatstone, con dos resistencias variables de las tres conocidas. Nótese que los cuatro resistores están conectados en forma romboidal, o sea como dos brazos paralelos sobre la fuente de tensión. La fuente de tensión está conectada en serie con una llave, y en uniones en diagonal al puente (puntos A y B). El galvanómetro de indicación central se conecta a través de los otros puntos de unión, C y D. Las resistencias variables son generalmente del tipo en que se indica su valor en ohm a medida que varía la misma. La resistencia desconocida R_x, conectada entre los puntos B y D, completa el puente del circuito. El puente de Wheatstone puede usarse para medir valores de resistencia con alcances que varían entre aproximadamente 0,001 ohm y 9,99 megohm. El uso de este tipo de puente generalmente se aplica a la medición de resistencias de precisión.

El funcionamiento del puente puede ser explicado de la siguiente manera: cuando la llave S_1 está cerrada, la corriente total del circuito fluirá de la fuente de tensión al punto A del puente. La corriente total se dividirá en I_1 e I_2, y el valor de las corrientes dependerá de la cantidad de resistencia en las ramas respectivas. La corriente de las ramas individuales, cuando fluye por las resistencias respectivas, proveerá una tensión en cada resistor en proporción a su valor. Mediante el ajuste de los resistores variables, pueden variarse las corrientes de los brazos I_1 e I_2 hasta que los puntos C y D tengan el mismo potencial; entonces el galvanómetro conectado entre los puntos C y D no mostrará desviación de su aguja y se dirá que el puente Wheatstone está *balanceado*.

Antes de mostrar el uso del puente Wheatstone para determinar el valor de una resistencia desconocida, se mostrará la deducción de la ecuación fundamental. En la figura 8-15 vemos que, cuando el puente está balanceado, la tensión que apa-

rece en R_1 será igual a la tensión que aparece en R_3, y las tensiones de R_2 y R_x también serán iguales. Recordando que la corriente total del circuito se divide en las corrientes de las ramas I_1 e I_2, las caídas individuales serán: $I_1 R_1$; $I_1 R_2$; $I_2 R_3$; $I_2 R_x$. Puesto que las caídas de tensión a través de R_1 y R_3 y también R_2 y R_x son iguales, puede expresarse una ecuación que muestre estas relaciones:

$$I_1 R_1 = I_2 R_3$$
$$I_1 R_2 = I_1 R_x$$

La relación entre la caída de tensión de R_1 y R_2 debe ser igual a la relación existente entre la caída de tensión de R_1 y R_x puesto que cada combinación comprende una rama del circuito en paralelo. Esto se expresa con la ecuación:

$$\frac{I_1 R_1}{I_1 R_2} = \frac{I_2 R_3}{I_2 R_x}$$

Al simplificar la ecuación por eliminación de los términos I_1 e I_2, y despejando R_x, tenemos la ecuación siguiente:

$$R_x = \frac{R_3 R_2}{R_1} \qquad (8\text{-}24)$$

Esta es entonces, la ecuación fundamental usada para resolver los valores desconocidos de resistencia (R_x), en el circuito puente de Wheatstone.

Mediante esta ecuación y los valores de R_1, R_2 y R_3, como se ha indicado en la figura 8-15, puede determinarse el valor desconocido de la resistencia (R_x).

Tenemos:

$$R_x = \frac{R_3 R_2}{R_1}$$
$$= \frac{1000 \times 150{,}25}{100}$$
$$R_x = 1502{,}5 \text{ ohm}$$

Es importante recordar que los valores de R_1 y R_3; R_2 y R_x no tienen que ser iguales. Sin embargo, *es importante que la relación entre R_1 y R_3 sea igual a la relación entre R_2 y R_x*. Generalmente, la relación de R_1 a R_3 se hace igual a un múltiplo o fracción de 10. Por ejemplo, R_3/R_1 pueden ser convertidos a un valor igual a 10,100,1000, 1/10, 1/100, etcétera. Establecida esta relación, el valor de resistencia R_x se determina multiplicando el valor de la resistencia variable R_2, por la relación R_3/R_1, cuando el puente se ha balanceado.

Puente de alambre deslizante

El manejo del puente de alambre deslizante es el mismo que el del puente de Wheatstone recién tratado. Compárese el puente de alambre móvil mostrado en la figura 8-16, con el circuito del puente Wheatstone de la figura 8-15. El alambre de resistencia calibrado en el circuito del alambre deslizante, corresponde a dos resistencias variables (R_1 y R_2) en el circuito Wheatstone. La posición del contacto deslizante sobre la longitud del alambre calibrado determina la relación R_1 a R_3 y R_2 a R_x. Este contacto deslizante es movido a lo largo del alambre calibrado hasta que el galvanómetro indica una desviación igual a cero. En este punto, no hay diferencia de potencial entre los puntos C y D y el puente está calibrado.

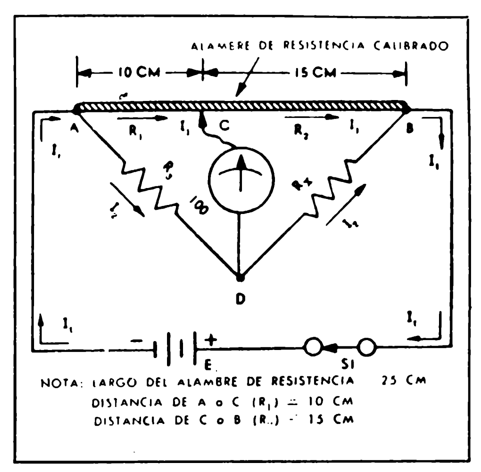


Figura 8-16. Puente de alambre deslizante

Puesto que el alambre utilizado tiene una resistividad uniforme, las secciones del alambre designadas con R_1 y R_2 tendrán un valor de resistencia que será proporcional a sus respectivas longitudes. Debido a que la resistencia y la longitud son directamente proporcionales, para determinar R_x puede reemplazarse en la fórmula la longitud en centímetros (cm) de R_1 y R_2. Por ejemplo, con un valor de 100 ohm para R_3, el puente estará balanceado cuando el contacto deslizante está situado a 10 cm del extremo izquierdo (punto A). El valor de la resistencia desconocida R_x es en consecuencia:

$$R_x = \frac{100 \times 15}{10}$$
$$= \frac{1500}{10}$$
$$R_x = 150 \text{ ohm}$$

En resumen, se puede ver que el puente Wheatstone y el de alambre, se usan principalmente co-

mo instrumentos de medida para determinar el valor de una resistencia desconocida. El funcionamiento de estos circuitos depende de la relación entre dos resistencias conocidas, comparadas con la relación existente entre otra conocida y la que se quiere hallar. No es importante que las resistencias sean de igual valor, pero sí lo es que las relaciones sean iguales.

8-5 RESUMEN

Por medio de la aplicación de las leyes de Kirchhoff se dispone de otra manera de calcular valores desconocidos del circuito. Cuando se aplican las leyes de tensión y corriente a mallas complicadas, se obtiene una mayor comprensión de la distribución de las mismas, sin tener que efectuar mediciones. El uso de las leyes de tensión y de corriente no está restringido a los circuitos de corriente continua, puesto que se aplican por igual a circuitos simples o complejos de corriente alternada. Los pasos explicados en este capítulo ofrecen el medio a seguir cuando se utilizan estas leyes para determinar las tensiones y corrientes desconocidas de cualquier circuito.

Un divisor de tensión, tal como se ha tratado en este capítulo, es una malla con resistencia conectada a través de los terminales de salida de una fuente de tensión. El propósito de un divisor de tensión, es dividir la tensión de la fuente en distintos valores para las diversas aplicaciones del circuito. Dos factores principales de cualquier malla del divisor de tensión son las tensiones de salida resultantes en la posición de carga y no-carga. Los méritos de dos o más sistemas de divisores de tensión pueden compararse examinando el porcentaje de regulación de tensión para cada circuito.

En el diseño o mantenimiento de cualquier circuito o sistema electrónico, se debe tener en cuenta un importante factor: el consumo de potencia eléctrica. La pérdida de energía más común en equipos electrónicos es aquella disipada en forma de calor. Tal pérdida se llama comúnmente disipación de calor, o pérdida I^2R. Para reducir la posibilidad de recalentamiento de un resistor y su consiguiente deterioro (al quemarse), se utiliza generalmente un factor de seguridad de potencia del orden de 100 por ciento cuando se seleccionan resistores para un circuito especial.

CUESTIONARIO

1. Explique brevemente la diferencia entre una fuente de tensión y una caída de tensión de un equipo eléctrico.

2. Cuando se sigue el flujo de corriente alrededor de una espira cerrada, una caída de tensión trazada en el sentido supuesto del flujo de la corriente, es precedida por un signo ....; y una caída de tensión trazada en sentido opuesto al supuesto del flujo de la corriente, es precedida por un signo ......

3. ¿En qué dirección se debe suponer que fluye la corriente cuando se usan las leyes de Kirchhoff para determinar cantidades de circuitos?

4. Cuando se utiliza la ley de corriente de Kirchhoff, la corriente que entra en una unión (nodo) es precedida por el signo ....; mientras que la corriente que deja una unión es precedida por el signo ....

5. ¿Qué requisitos tiene la aplicación de la ley de tensión de Kirchhoff a las ramas de un circuito eléctrico complejo?

6. ¿Qué requisitos tiene la aplicación de la ley de corriente de Kirchhoff a las uniones de un circuito eléctrico complejo?

7. Refiriéndose a la parte B de la figura 8-4 del texto, supóganse los siguientes nuevos valores del circuito, y resuélvanse para la corriente total del circuito y su sentido verdadero: $E_1 = 60$ V; $E_2 = 120$ V; $R_1 = 50$ ohm; $R_2 = 40$ ohm.

8. Refiriéndose a la parte A de la figura 8-6 del texto, supónganse los siguientes nuevos valores del circuito, y resuélvanse para todos los valores de corriente, caídas de tensión y la dirección verdadera del flujo de la corriente. $E_1 = 28$ V; $E_2 = 12$ V; $R_1 = 20$ ohm; $R_2 = —10$ ohm; $R_3 = 30$ ohm; $R_4 = 50$ ohm; $R_5 = 100$ ohm.

9. Véase la figura 8-17. Determínense todos los valores desconocidos de corriente y circuito, y determine si el sentido supuesto de la corriente por R_8 es correcto.

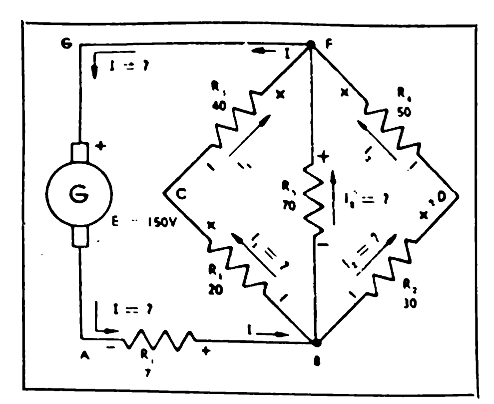


Figura 8-17. Circuito en serie-paralelo con cuatro valores de corriente desconocidos

10. Explique la diferencia del significado de las palabras potencia y trabajo.

11. ¿Cuál es la pérdida de potencia más común en equipos eléctricos?

12. Nombre varias unidades de medida de energía eléctrica.

13. Se conecta un resistor de 5 megohm a través de una fuente de 250 volt. Determínese la potencia disipada por el resistor.

14. La potencia disipada por un resistor a de 400 ohm es de 3.600 watt. Calcúlese el flujo de corriente a través del resistor.

15. Establezca la utilidad de la malla de un divisor de tensión.

16. ¿Es la tensión de salida de un divisor de tensión cargado mayor o menor que la de un circuito descargado?

17. ¿Cuándo funciona efectivamente un divisor de tensión cargado en la condición de no-carga?

18. Un divisor de tensión tiene descargado una tensión de salida de 175 volt, y cargado, de 168 volt, ¿cuál es el porcentaje de regulación?

19. La potencia de un divisor de tensión consistente en varias resistencias individuales se determina por ....

20. Explique brevemente el significado de: aumento lineal de resistencia, disminución de resistencia hacia la izquierda y disminución de resistencia hacia la derecha de resistencias variables.

21. Explique las aplicaciones más elementales de un potenciómetro y de un reóstato.

22. Véase la figura 8-18, y resuélvanse todos los valores de corriente y tensión.

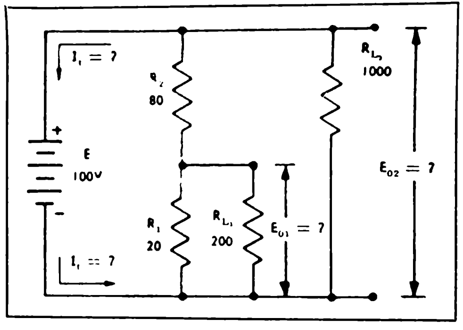


Figura 8-18. Divisor de tensión cargado con dos resistencias (R_{L1} y R_{L2})

23. Refiriéndose a la parte B de la figura 8-9 del texto, supónganse los siguientes nuevos valores, y hállense todos los valores de corriente, tensión, y el porcentaje de regulación de la malla.
$R_{L1} = 250$ K $R_{L2} = 500$ K $R_{L3} = 820$ K

24. ¿Cuál es la aplicación más elemental del circuito tipo puente Wheatstone y del tipo alambre deslizante?

25. Supóngase que el contacto sobre el alambre deslizante en la figura 8-16 está a 5 cm. a la derecha del punto A. ¿Cuál es el valor de R_x?

CAPITULO IX

Inductancia

9-1 Introducción

La propiedad de un circuito eléctrico por la cual existe una fuerza que tiende a oponerse a los *cambios* de intensidad de corriente en el mismo, se llama *inductancia.* La inductancia se opone a aumentos y disminuciones de la corriente. Es también una medida de la capacidad que tiene un circuito eléctrico de almacenar y entregar energía magnética. Puesto que todo circuito eléctrico contiene algunas propiedades inductivas, siempre se debe considerar a la inductancia en los análisis de los circuitos. Los elementos diseñados especialmente que se agregan a un circuito para introducir inductancia, se llaman *inductores.* Un inductor puede tomar cualquier forma, pero fundamentalmene no es más que una bobina de alambre. En la práctica se usan distintos nombres para referirse a los inductores, como ser: choques, bobinas de choque, impedancia, inductancia, reactor inductivo y reactor. En la sección 2-7 hemos visto el dibujo de varios tipos de inductores.

La inductancia que posee una bobina de alambre se debe principalmente a la disposición física del alambre, siendo importantes el número de vueltas, su separación, la forma de la bobina y la permeabilidad del material del núcleo. Es importante recordar que la inductancia de una bobina de alambre depende también de las dimensiones físicas de la misma y no de la tensión aplicada o corriente que la atraviesa. Contrariamente a la resistencia que ofrece una oposición a todas las corrientes, la inductancia ofrece sólo resistencia a los cambios en la corriente. Aunque un inductor es un elemento de circuitos de corriente alterna, pueden establecerse algunas de sus propiedades a través de la aplicación de una corriente continua. En consecuencia, de ello se tratará a continuación.

9-2 AUTOINDUCCIÓN

La auto-inducción es una forma de inducción electromagnética (sección 5-12), que resulta en una tensión inducida en un conductor como consecuencia de cambios en el flujo de la corriente por el mismo conductor.

Siempre que una corriente pasa por un alambre o una bobina de alambre, se produce un campo magnético alrededor del conductor. Si se variara la intensidad de la corriente que pasa por el alambre (por ejemplo de 1 ampere a 3 ampere y luego nuevamente a 1 ampere), el campo magnético formado alrededor del alambre o bobina también variaría en intensidad. Las líneas de fuerza magnéticas de este campo variable cortan las espiras de alambre de la bobina y originan una fuerza electromotriz que se opone a la variación de la corriente que le dio origen.

Principios de autoinducción

Cuando comienza a fluir corriente por un conductor, se crea un campo magnético. Este campo envuelve al conductor en forma de círculos concéntricos y aumenta en intensidad a medida que aumenta la corriente (véase la figura 5-19). Durante el período en que el flujo aumenta en intensidad, se induce una tensión en el conductor. Esta inducción de tensión siempre tiene un sentido tal, que tiende a oponerse a los cambios en la corriente.

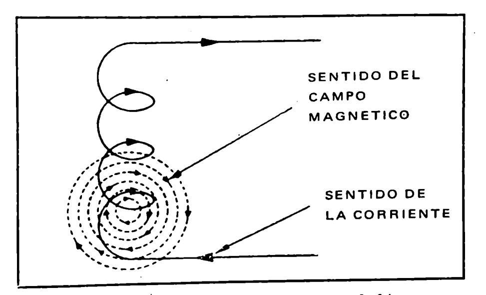


Figura 9-1. Autoinducción en una bobina

Es más fácil imaginarse la auto inducción en una bobina que en un conductor recto. Véase la figura 9-1. Cuando la corriente en una vuelta de la bobina aumenta repentinamente, las líneas de fuerza alrededor de esta vuelta se expanden y se mueven hacia la periferia. De esta forma, cortan algunas o todas las vueltas vecinas de la bobina, induciendo una tensión en estas vueltas. Esta tensión inducida provoca una corriente con un sentido opuesto al de la corriente original (recuérdese la regla de la mano izquierda). La inversa de esta ley también es verdad, es decir, que cuando decrece la corriente en una vuelta determinada, el campo se achica o contrae, y nuevamente corta algunas o todas las vueltas o espiras vecinas, pero en sentido contrario. El corte de estas vueltas por el campo decreciente también induce una tensión. Cada vuelta de la bobina actúa sobre las otras de la misma manera, aumentado en consecuencia la autoinducción.

La tensión (f.e.m.) que se induce en una bobina cuando aumenta la corriente, está en sentido opuesto a la f.e.m. aplicada y, en consecuencia, se la llama fuerza contra electromotriz (f.c.e.m.). Cuando la corriente llega a su valor constante máximo, el campo se estabiliza y la F.C.E.M. inducida, desaparece. Sin embargo, la energía requerida para establecer el campo magnético volverá al circuito cuando la corriente disminuye. Pero cuando el campo magnético se reduce, es inducida una fuerza electromotriz en sentido opuesto al de un campo que se expande, y la polaridad será igual a la de la tensión original, es decir, en un sentido tal que prolongue el flujo de la corriente.

Podemos decir que la autoinducción es la propiedad que posee un circuito que tiende a impedir el establecimiento o cambio de la corriente. La autoinducción es la analogía eléctrica de la inercia mecánica, que tiende a oponerse al aumento o disminución de la velocidad de un cuerpo. Una bobina de alambre actúa como si tuviera inercia, es decir, que se resiste a cualquier cambio, especialmente a un cambio brusco de la corriente que fluye por el mismo.

Unidad de inductancia

La propiedad inductiva total de cualquier bobina se mide por una unidad de inductancia llamada *henrio*. Se dice que un circuito posee una inductancia de 1 henrio, cuando un *cambio* de corriente de 1 ampere por segundo origina una f.e.m. inducida de un volt.

El método común para indicar la inductancia de un inductor es marcarlo con su valor correcto. En las aplicaciones prácticas, el henrio es, a veces, un valor demasiado elevado; por esta razón se utilizan frecuentemente las unidades de *milihenrio (mh)* igual a un milésimo de henrio y el *microhenrio* (μh) igual a un millonésimo de henrio. En algunas fuentes de poder y sistemas de audioamplificadores se pueden usar inductores de 15 a 30 henrios pero estos valores muy grandes de inductancia, generalmente están limitados a dichas aplicaciones específicas.

Factores que afectan la inductancia

La cantidad de inductancia dentro de un conductor depende de la relación entre el flujo magnético producido y la corriente que fluye por la bobina. La inductancia, designada con la letra L, representa la medida del número de líneas de fuerza que cortan o unen las vueltas de una bobina. Se llama unidad de inductancia o henry, a cien millones de líneas de fuerza (10^8), que cortan una espira de la bobina cuando la variación de la corriente es de un ampere. En consecuencia, la inductancia de una bobina es igual al número de sus vueltas, multiplicado por el flujo magnético que las concatena, dividido por la variación de la corriente que fluye por la bobina. Se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$L = \frac{N\phi}{I \times 10^8} \qquad (9\text{-}1)$$

L = Inductancia, en henrio.
N = número de vueltas de la bobina
ϕ = flujo magnético que une las vueltas
I = variación de la corriente por la bobina, en ampere
10^8 factor constante para transformar el valor de inductancia en unidades prácticas.

El flujo producido por una bobina cuya longitud es 10 o más veces su diámetro, se halla usando la siguiente ecuación:

$$\phi = \frac{1{,}26\ N I A \mu}{l} \qquad (9\text{-}2)$$

Reemplazando el segundo miembro de esta ecuación en la anterior para la inductancia (L), es decir, el valor de flujo de la misma, y reduciendo el resultado a su expresión más simple, se obtiene una ecuación para determinar la inductancia de una bobina de un largo 10 o más veces mayor que su ancho. En consecuencia:

$$L = \frac{1{,}26\ \mu\ AN^2}{l \times 10^8} \qquad (9\text{-}3)$$

Donde:

L, N y 10^8 fueron definidos anteriormente
μ = permeabilidad del material del núcleo
A = sección del núcleo, en centímetros cuadrados
l = largo del núcleo l en centímetros
1,26 = factor constante derivado de la relación largo-ancho

Nótese que la inductancia varía directamente con el cuadrado del número de vueltas de la bobina, la permeabilidad del material del núcleo y la superficie de la sección transversal del núcleo. Si se aumenta cualquiera de estos factores se aumentará la inductancia. Sin embargo, la misma disminuye si se aumenta la longitud del núcleo de la bobina.

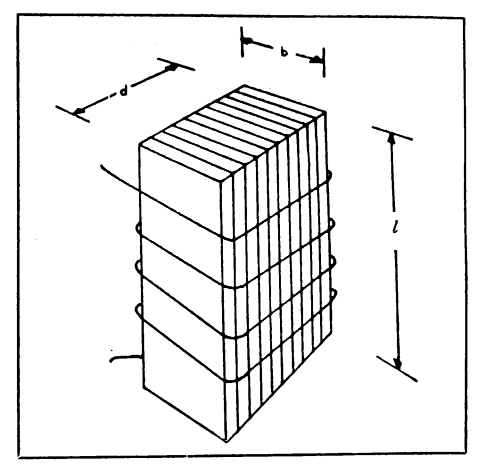


Figura 9-2. Bobina arrollada sobre un núcleo

Como ejemplo, calcúlese la inductancia del circuito de la figura 9-2, con los siguientes valores, largo, ancho y espesor del núcleo: 50, 5 y 2 centímetros respectivamente; el número de vueltas de la bobina es de 200, y la permeabilidad del núcleo es de 5.000.

El primer paso para resolver el problema es determinar la sección transversal del núcleo,

$$A = bd$$
$$= 2\ \text{cm} \times 5\ \text{cm}$$
$$A = 10\ \text{cm}^2$$

Luego resuélvase para la inductancia:

$$L = \frac{1{,}26\ \mu\ AN^2}{l \times 10^8}$$
$$= \frac{1{,}26 \times 5000 \times 10 \times 200^2}{50 \times 10^8}$$
$$= \frac{1{,}26 \times 5 \times 4 \times 10^8}{50 \times 10^8}$$
$$= \frac{25{,}2}{50}$$
$$L = 0{,}504 \text{ henry ó } 504 \text{ mh (milihenry)}$$

Cuando las dimensiones del material del núcleo se dan en pulgadas, se puede determinar la inductancia por las siguientes fórmulas:

$$L = \frac{3{,}20\ \mu\ AN^2}{l \times 10^8} \qquad (9\text{-}4)$$

donde:

L, μ, N, y 10^8 se han definido previamente
A = sección transversal del núcleo,
l = largo del núcleo en pulgadas

Como ejercicio, resuélvase la inductancia de una bobina con las siguientes dimensiones del núcleo: 2; 0,5 y 0,2 pulgadas de largo, ancho y espesor, respectivamente, y con el mismo valor de permeabilidad y número de vueltas que el ejemplo anterior.

Del ejemplo de la figura 9-2, es evidente que la inductancia que presentará una bobina cuando se la conecta en un circuito eléctrico, puede determinarse por las propiedades físicas de la misma. Hay, sin embargo, otros factores que afectan la inductancia de una bobina, pero su consideración la dejamos para más adelante.

Relación entre inductancia, tensiòn inducida y variación de corriente

Poco tiempo después del descubrimiento de Oersted de la existencia de un campo magnético alrededor de un conductor de corriente, un físico alemán llamado Lenz (véase la ley de Lenz, sección 5-12), descubrió que siempre que una corriente de magnitud variable fluye por un conductor, se induce una tensión en el mismo. La relación de la tensión inducida llamada fuerza electromotriz inducida, con respecto a la variación de corriente se expresa por medio de la siguiente fórmula:

$$e = -L\frac{\Delta i}{\Delta t} \qquad (9\text{-}5)$$

donde:

e = tensión inducida o fuerza electromotriz inducida
L = inductancia, en henrio
$\frac{\Delta i}{\Delta t}$ = régimen de variación de la corriente, en ampere por segundo ($\frac{\Delta i}{\Delta t}$ representa un pequeño cambio del valor de la corriente Δ i en un pequeño intervalo de tiempo, Δ t) *

La ecuación muestra que la tensión inducida depende de la inducción presente en el circuito o bobina y del ritmo de variación de la corriente. El signo menos no quiere decir que la tensión inducida (e) es negativa; indica solamente que se opone al cambio de la corriente. Específicamente, el signo menos significa que cuando la corriente aumenta, la fuerza electromotriz inducida es negativa; y cuando la corriente disminuye, la fuerza electromotriz inducida es positiva. Esto está de acuerdo con la Ley de Lenz.

Como ejemplo para determinar la tensión inducida de un inductor, considérese una bobina cuya corriente varía de 5 a 7 ampere por segundo, y cuya inductancia es de cuatro henrio.

La tensión inducida será:

$$e = -L\frac{\Delta i}{\Delta t}$$
$$= 4 \times \frac{(7\text{-}5)}{1}$$
$$= 4 \times 2$$
$$e = 8 \text{ volt}$$

Puede entenderse el significado de la ecuación 9-5, observando que el ritmo de cambio de la corriente (Δ i / Δ t) describe la rapidez con la cual el campo magnético corta el conductor, en este caso las vueltas del inductor L. Cuanto más rápido sea el corte, más grande será la tensión inducida en el circuito. Se debe recordar, sin embargo, que no habrá tensión inducida mientras no varíe la corriente que fluye por la bobina. Se inducirá tensión *sólo* cuando varíe la corriente circulante por la bobina.

Similar a cualquier ecuación de 3 elementos, esta fórmula para la tensión inducida instantánea puede presentarse de forma que se utilice para encontrar la inductancia o el ritmo de variación de la corriente.

$$e = -L\left(\frac{\Delta i}{\Delta t}\right);\ L = -\frac{e}{\left(\frac{\Delta i}{\Delta t}\right)};\ \left(\frac{\Delta i}{\Delta t}\right) = -\frac{e}{L}$$

Energía almacenada en un campo magnético

Puesto que hay una oposición al cambio de la corriente en un inductor, se requiere alguna forma de energía para provocar un aumento de la corriente del mismo. Esta energía se obtiene de una batería o de alguna otra fuente de potencia eléctrica. De acuerdo con la ley de conservación de la energía eléctrica, la misma no puede ser ni creada ni destruida. En consecuencia, la energía eléctrica usada para vencer la propiedad de inductancia de una bobina, debe transformarse en algu-

* En los textos de electrónica, en los que se presentan pequeñas variaciones de cantidad, el símbolo griego delta (Δ) es usado a menudo, para indicar que una variación tiene lugar. La razón $\frac{\Delta i}{\Delta t}$ puede compararse a la aceleración mecánica de un automóvil que, parado, arranca y alcanza una velocidad de 20 kilómetros por hora en 40 segundos, la variación (o incremento) es de 0,5 kilómetros por hora, por segundo.

na otra forma de energía. Los experimentos han demostrado que esta energía es almacenada en el campo magnético alrededor de la bobina. La ecuación que muestra la relación entre energía, inductancia y corriente es:

$$W = \frac{1}{2} LI^2 \qquad (9\text{-}6)$$

Donde:

W = energía almacenada en el campo magnético, en joule
L = inductancia de la bobina, en henrio
I = valor instantáneo de la corriente que fluye por la bobina, en ampere.

Suponiendo que la bobina tiene una inductancia de dos henrio y que la corriente instantánea que fluye por la misma es de tres ampere, la cantidad de energía almacenada en el campo magnético formado por la corriente es:

$$W = \frac{1}{2} LI^2$$

$$W = \frac{1}{2} \times 2 \times (3)^2$$

$$W = 9 \text{ joule}$$

Se han elaborado muchas teorías para explicar cómo se almacena la energía en un campo magnético. La teoría más convincente que explica este fenómeno, establece que la presencia de un campo magnético requiere que las órbitas de los electrones de los átomos en dicho campo estén alineadas de una manera particular. Esto quiere decir que cuando una corriente fluye por el conductor, debe proveer energía adicional a los electrones de los átomos que hay dentro y que circundan el alambre, para alinearlos. Cuando cesa la corriente, desaparece el campo magnético, permitiendo a los electrones tomar su antigua posición, y la energía utilizada para la alineación volverá al circuito.

Hay una analogía entre la acción de un campo magnético alrededor de un conductor de corriente, y la acción de un volante mecánico. Se debe ejercer una fuerza sobre el volante para ponerlo en movimiento, y debe utilizarse energía para darle velocidad final. La energía provista para la aceleración es almacenada dentro del volante. A medida que la velocidad disminuye, la energía se transmite nuevamente al eje, el cual es capaz de realizar un trabajo. De la misma manera, la energía almacenada por un campo magnético alrededor de un conductor es devuelta al circuito cuando desaparece el campo magnético.

9-3 EFECTOS DE LA INDUCTANCIA EN LOS CIRCUITOS DE CORRIENTE CONTINUA

Tal como se ha mencionado más arriba, los efectos de la inductancia aparecen cuando hay un cambio en el flujo de corriente del circuito. Asimismo, colocando un inductor en un circuito de corriente continua, se afecta el valor de la corriente. Antes de analizar qué es lo que le ocurre a la corriente continua en un inductor práctico, se deberá considerar el efecto del aumento y disminución de la corriente en un resistor y en un inductor ideal.

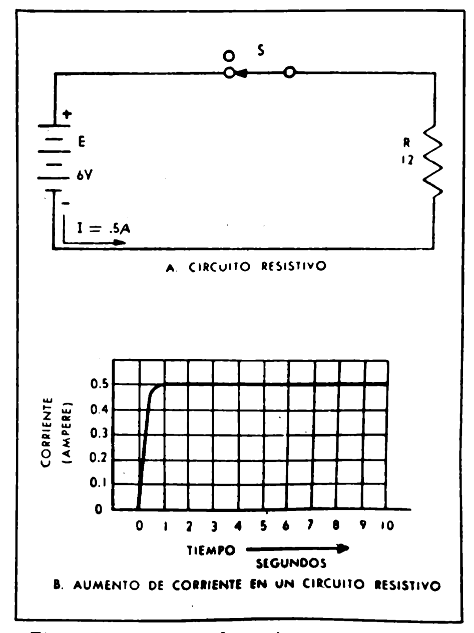


Figura 9-3. Aumento de corriente en un resistor

Aumento y disminución de la corriente en un resistor

Véase la figura 9-3, parte A, que muestra el circuito resistivo de corriente continua, consistente en una fuente de tensión, una llave y un resistor conectado en serie. Cuando se cierra la llave S, la corriente fluirá del terminal negativo de la batería, por el resistor y la llave, al terminal positivo de la misma. En el instante en que se cierra la llave, la corriente en el circuito aumenta a su valor máximo, como se ha indicado con la curva de corriente en la parte B de la figura 9-3. En realidad,

la corriente no cambia del valor cero a un valor máximo instantáneamente. Sin embargo, el intervalo de tiempo es tan pequeño que el aumento se considera instantáneo. La corriente en el circuito se mantendrá en su nivel máximo hasta que se abra la llave, y entonces la corriente caerá instantáneamente a cero.

Aumento y disminución de corriente en un inductor ideal

Un inductor ideal es un componente teórico que posee solamente la propiedad de inductancia, sin resistencia. Véase la figura 9-4, parte A, que muestra un circuito inductivo de corriente continua, consistente en una fuente de tensión, una llave y un inductor ideal conectado en serie. Cuando la llave de este circuito se cierra en la posición 1 (uno), la corriente no se eleva instantáneamente, debido a la inductancia de la bobina. En efecto, la corriente aumenta en forma lineal con el tiempo, siempre que la fuente de tensión se mantenga conectada al circuito. Este aumento de corriente se ilustra en la parte B de la figura.

Si se recuerda la ecuación que expresa la relación entre la tensión inducida y el ritmo de variación de la corriente en una bobina,

$$e = -L\frac{\Delta i}{\Delta t}$$

es evidente que en un inductor ideal, la fuerza electromotriz inducida debe ser igual en todo momento a la tensión aplicada, para producir un aumento lineal en la corriente. Por ejemplo, cuando se conecta una batería de 6 volt a un inductor de 6 henrio, el cambio de corriente debe ser de un ampere por cada segundo de tiempo. Nótese que en la parte B de la figura 9-4, por cada segundo de tiempo a lo largo de la línea horizontal, la corriente aumenta un ampere, satisfaciendo en consecuencia la ley de Lenz. Si se cambia la posición de la llave de 1 a 2, como se muestra en la figura 9-5, se quitará la fuente de tensión del inductor.

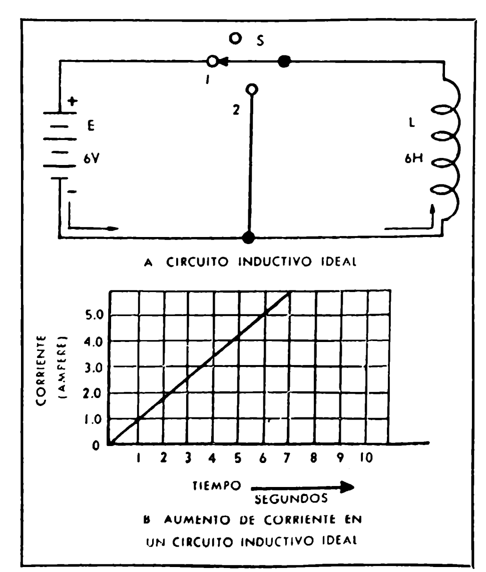


Figura 9-4. Aumento de corriente en un inductor ideal

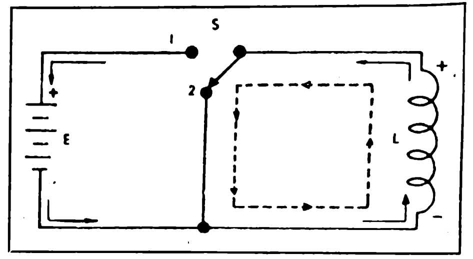


Figura 9-5. Inductor ideal en cortocircuito

La corriente original del circuito, representada en la figura por la flecha de trazo grueso, fue suministrada por la batería, pero ahora el inductor tiene una corta conexión a través de sus terminales. Puesto que la corriente de la batería ha dejado de fluir, el campo magnético alrededor del inductor no aumenta más, y puesto que éste ha sido acortado, el campo comenzará a desaparecer. En el proceso de desaparición, las líneas de fuerza vuelven a cortar las vueltas adyacentes del inductor y en consecuencia, inducen una fuerza contra electromotriz para oponerse al campo que desaparece. Esta acción origina una corriente que fluirá por el inductor y por el camino corto provisto por la posición 2 de la llave, en el mismo sentido que antes. La corriente fluirá hasta que haya desaparecido por completo el campo magnético, y disminuirá en forma lineal en un ritmo determinado por los mismos factores que antes determinaron el ritmo de aumento En consecuencia, un inductor ideal es considerado como una inductancia en donde la corriente aumenta o decrece a un ritmo constante.

Esta condición nunca se alcanza en las aplicaciones prácticas.

Aumento de corriente en un inductor práctico

El inductor ideal es útil como base para entender el inductor práctico. A continuación se considera

el circuito que se muestra en la parte A de la figura 9-6. Este circuito consiste en una fuente de tensión conectada en serie con un inductor, un resistor y una llave. El resistor R incluye toda la resistencia del circuito, es decir, la resistencia del inductor a la corriente continua y la resistencia interna de la batería. Por lo general, la resistencia a la corriente continua de un inductor no es muy grande; la resistencia depende primeramente de la resistividad y la longitud del alambre utilizado en la fabricación de la bobina. Esta resistencia es considerada generalmente como el valor de resistencia que puede calcularse por medio del uso de la ley de Ohm, y las mediciones de

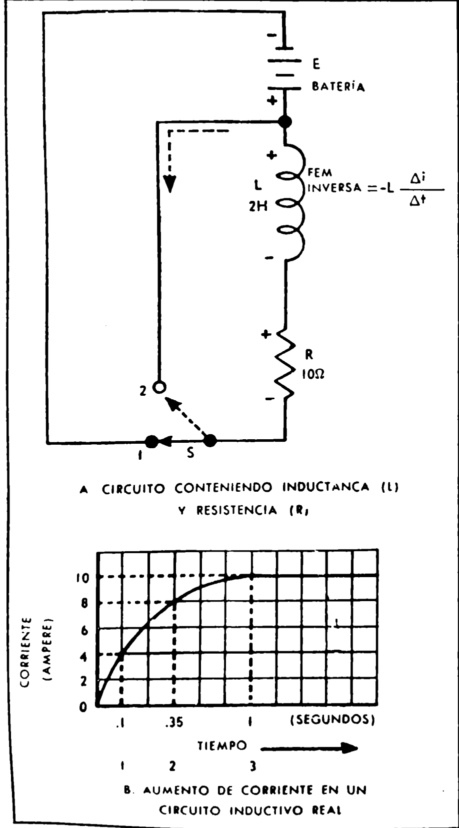


Figura 9-6. Aumento de corriente en un inductor real

corriente y tensión obtenidas cuando fluye por el inductor una corriente continua constante.

En este circuito, cuando se cierra la llave, la corriente no aumenta instantáneamente a su valor máximo como en el circuito resistivo, como consecuencia de la fuerza contra electromotriz en la bobina; y tampoco aumenta la corriente en un ritmo lineal, por efecto de la resistencia, como ocurre en el circuito inductivo ideal. La corriente aumenta a un ritmo entre las dos situaciones ideales, como se muestra en la parte B de la figura 9-6. Durante el tiempo en que aumenta la corriente, hay presentes tres tensiones en el circuito. Estas tensiones son: la fuente de tensión aplicada E; la caída de tensión a través del resistor y la f.e.m. inducida sobre el inductor.

$$L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

De acuerdo con la ley de tensión de Kirchhoff, la suma algebraica de todas las caídas de tensión en cualquier circuito debe ser igual a cero. Esto quiere decir que la tensión aplicada debe ser igual a la suma de las caídas de tensión a través del resistor y la fuerza electromotriz inducida, a través de la bobina. Si se expresa por fórmula algebraica, obtenemos:

$$E = IR + L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

Esta ecuación, que es una generalización de la ley de Ohm para incluir la inductancia en un circuito, expresa las condiciones en el circuito en cualquier instante. Muestra que parte de la tensión aplicada se utiliza para forzar la corriente a través de la bobina, contra la acción de la fuerza electromotriz inducida originada por la corriente que aumenta, y que el resto de la tensión aplicada se usa para forzar la corriente a través de la resistencia del circuito.

Para ilustrar esto, supóngase que los valores de la tensión aplicada, inductancia de la bobina, y resistencia total del circuito son: 100 volt, 2 henrio y 10 ohm, respectivamente. En el instante en que se cierra la llave (cero segundos, parte B de la figura 9-6) la corriente en el circuito empieza a aumentar a partir de cero. En este momento, no hay caída de tensión a través de la resistencia, puesto que la fuerza electromotriz inducida es igual a la tensión aplicada de la batería (100 volt). Dado que la inductancia de la bobina es de 2 henry, el ritmo inicial de variación de la corriente deberá ser de 50 ampere por segundo (100/2 = 50). Este es el ritmo de cambio de la corriente solamente en el instante en que la llave se cierra.

La manera en que aumenta la corriente a través del tiempo se muestra en la parte B de la figura.

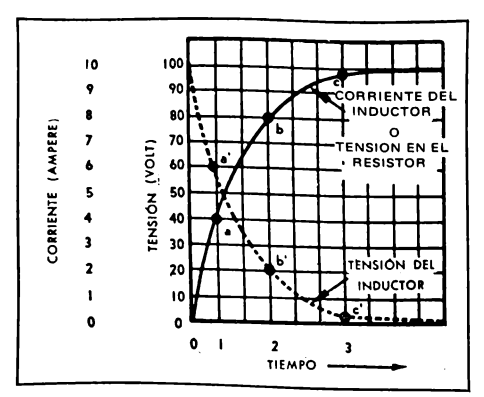


Figura 9-7. Relación entre corriente y tensión en un circuito inductivo real

En el momento 1 (uno), la corriente es de 4 ampere. La caída de tensión a través del resistor es entonces de 4 ampere a través de 10 ohm, o sea 40 volt. De la ecuación más arriba mencionada, resulta evidente que si la tensión aplicada es de 100 volt y la caída IR a través del resistor es 40 volt, la tensión a través de la bobina tendrá que ser de 60 volt. Es decir que 60 volt de los 100 de la batería son utilizados para contrarrestar la f.e.m. inducida y 40 volt se emplean para forzar la corriente a través del circuito. Asimismo, puesto que la f.e.m. inducida es de 60 volt y la inductancia de la bobina 2 henrio, el ritmo de cambio de la corriente en el momento 1, es igual a 30 ampere por segundo $(60/2 = 30)$.

En el momento 2, la corriente ha aumentado a 8 ampere. La caída IR a través del resistor es ahora de 80 volt, y puesto que la tensión aplicada es de 100 volt, la f.e.m. inducida a través de la bobina será de 20 volt. Si la f.e.m. inducida es de 20 volt y la inductancia 2 henry, el ritmo de variación de la corriente en el momento 2 será de 10 ampere por segundo.

Finalmente, en el momento 3, la corriente llega a su valor máximo estacionario, haciendo que el campo magnético alrededor del conductor deje de variar. En este momento, ya no hay f.e.m. inducida en la bobina, y la tensión total aplicada de 100 volt aparece a través de la resistencia del circuito. El valor estacionario de corriente es ahora de 10 ampere: la tensión de la batería dividida por el valor de la resistencia del circuito. Esta es la máxima corriente que puede fluir por el circuito. Para entender el cambio de tensión y corriente en el circuito de la parte A de la figura 9-6, véase el gráfico ilustrado en la figura 9-7. Se puede ver que mientras la corriente aumenta, la caída de tensión a través de la resistencia del circuito también aumenta y la f.e.m. inducida de la bobina disminuye. Los puntos a-a', b-b' y c-c' indican las tensiones y la corriente en los momentos 1, 2 y 3 respectivamente. Por ejemplo, en el momento 2 la f.e.m. inducida debida a la inductancia es de 20 volt, la corriente es de 8 ampere, y la tensión a través de la resistencia del circuito es de 80 volt; asimismo el ritmo de aumento de la corriente es de 10 ampere por segundo. Esta curva es representativa sólo para los valores de inductancia, resistencia, resistencia del circuito, y tensión aplicada indicada en la parte A de la figura 9-6.

Retardo de la corriente en un inductor

El flujo de corriente en un circuito inductivo provoca una f.c.e.m. que se opone a la corriente. De la misma forma, al tratar de interrumpir la corriente en un circuito inductivo, se provoca una f.e.m. que tiende a hacer que la corriente persista por un corto período de tiempo antes de decrecer a cero. La forma de la curva de corriente decreciente es la inversa de la curva de aumento de la corriente recién estudiada.

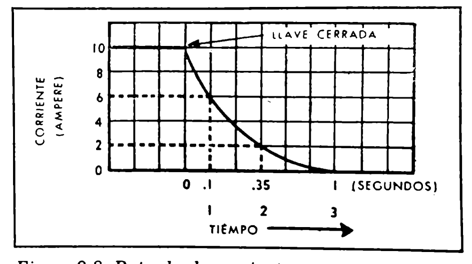


Figura 9-8. Retardo de corriente en un inductor real

En la fig. 9-8 se ve una curva de decrecimiento de la corriente. Esta curva representa el flujo de la corriente en el circuito de la parte A de la figura 9-6, cuando se ha movido la llave S a la posición 2 después que la corriente ha alcanzado su máximo de 10 ampere. La llave en posición 2 provoca un cortocircuito a través del inductor y la resistencia del circuito en serie, y también desconecta la batería del circuito y, en consecuencia, elimina el potencial que origina el flujo de la corriente. Puesto que el potencial de la batería ha sido eliminado, la corriente tiende a bajar a cero en forma instantánea. Sin embargo, el campo magnético que desaparece alrededor de la bobina, corta las vueltas de

la misma e induce una fuerza electromotriz que tiende a mantener la corriente. La energía magnética almacenada, es liberada y disipada en forma de calor en la resistencia del circuito. Nótese que la curva de caída de la corriente de la figura 9-8 es exactamente la inversa de la curva de aumento de la corriente de la figura 9-6. En el momento 1 la corriente ha decrecido 4 ampere; en el momento 2, 8 ampere y en el momento 3, 10 ampere. Al comparar estos valores con los mismos tiempos en la parte B de la figura 9-6, se puede apreciar que el cambio relativo en la corriente es el mismo en valor, pero en sentido opuesto.

Constante de tiempo R-L

Al estudiar el aumento de la corriente en un circuito inductivo real (no ideal), se vio que el tiempo requerido por la corriente para llegar a su valor máximo, depende de la resistencia e inductancia en el circuito. En realidad, este tiempo es determinado por el cociente entre la inductancia del circuito L y la resistencia del mismo R. Este cociente de R y L se llama *constante de tiempo* o *tiempo R-L* del circuito. Específicamente, la *constante de tiempo* de un circuito inductivo representa el tiempo en segundos requerido por la corriente para llegar al 63,2 por ciento de su valor máximo. Matemáticamente se expresa por la fórmula:

$$t = \frac{L}{R} \qquad (9\text{-}7)$$

donde:

t = tiempo en segundos en que la corriente alcanza el 63,2 % de su valor máximo
L = inductancia del circuito en henrio
R = resistencia del circuito en ohm

La constante de tiempo R-L del circuito en la parte A de la figura 9-6, se determina como sigue:

$$t = \frac{L}{R}$$

$$= \frac{2}{10}$$

$$t = 0{,}2 \text{ segundos}$$

El tiempo requerido para alcanzar otros valores que no sean el 63,2 % de la corriente máxima, sigue una curva llamada *curva exponencial*. Para entender su significado, véase la parte A de la figura 9-9 en la cual está la curva de constante de tiempo. Como se muestra en la figura al final de 0,2 segundos (tiempo 1 R-L), la corriente a través del inductor habrá aumentado a 6,32 ampere (punto a). Este valor se encontró como sigue: puesto que el máximo valor de corriente en el circuito es de

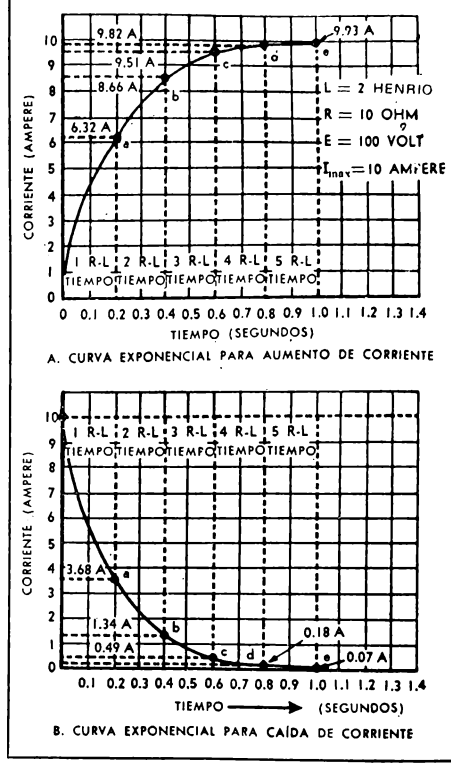


Figura 9-9. Curvas exponenciales mostrando aumento y disminución de corriente en un circuito inductivo real

10 ampere, y en 0,2 segundos se alcanza el 63,2 % del valor máximo de corriente, la corriente después del tiempo 1, R-L será:

$$I_{1R\text{-}L} = I_{máx.} \times 63{,}2\ \%$$

$$= 10 \times 0{,}632$$

$$I_{1R\text{-}L} = 6{,}32 \text{ ampere}$$

La constante R-L de tiempo se mantendrá igual siempre que los valores de resistencia e inductancia no varíen. Por lo tanto, después de 0,4 segundos o tiempo 2 R-L, la corriente habrá aumentado 63,2 % del valor restante entre 6,32 y 10 ampere. En otras palabras, puesto que el flujo de la corriente después del tiempo 1 R-L es de 6,32 ampere, y el flujo máximo de la misma es de 10 ampere, la corriente del circuito después del tiempo 2, R-L será de 6,32 ampere más el 63,2 % de la diferencia

entre 10 y 6,32 ampere. Expresado matemáticamente

$$I_{2R\text{-}L} = I_{1R\text{-}L} + 63{,}2\,\% \times (I_{max.} - I_{1R\text{-}1})$$
$$= 6{,}32 + 0{,}632 \times (10 - 6{,}32)$$
$$= 6{,}32 + 0{,}632 \times 3{,}68$$
$$= 6{,}32 + 2{,}34$$
$$I_{2R\text{-}L} = 8{,}66 \text{ ampere}$$

Por lo tanto, después de 0,4 segundos, la corriente en el circuito ha aumentado a 8,66 ampere, indicados en la figura por el punto b. Después de 0,6 segundos, o sea tiempo 3 R-L, la corriente ha aumentado a 9,51 ampere indicados por el punto c. Este valor de corriente se determina matemáticamente de una manera similar a aquélla usada para determinar la corriente después del segundo tiempo R-L. En 0,8 segundos o sea tiempo 4 R-L, la corriente ha aumentado a 9,82 ampere como se ha indicado en el punto d. El punto e representa un segundo entero (tiempo 5 R-L), momento en que la corriente es de 9,93 ampere.

El aumento exponencial de corriente prosigue hasta alcanzar el valor máximo; pero en la práctica, se considera alcanzado dicho máximo después de un segundo entero (tiempo 5 R-L).

Como consecuencia de que el aumento exponencial de la curva se determina por el cociente L/R del circuito, se ve que *disminuyendo* el valor de la resistencia del circuito, *aumenta* la constante de tiempo para el mismo valor de inductancia. En forma similar, *aumentando* la inductancia mientras se mantiene la resistencia constante, se obtiene el mismo efecto. Inversamente, disminuyendo el valor de inductancia (resistencia constante), o aumentando la resistencia (inductancia constante), se logra que la constante del tiempo disminuya. En la tabla 9-1 se aprecian los efectos de la inductancia y resistencia del circuito sobre la constante de tiempo.

TABLA 9-1. EFECTO DE LA INDUCTANCIA Y RESISTENCIA DEL CIRCUITO EN LA CONSTANTE DE TIEMPO

Inductancia L	Resistencia R	Constante $t = \frac{L}{R}$
↑	→	↑
↓	→	↓
→	↑	↓
→	↓	↑

Si cambia el valor máximo de la corriente debido a un cambio de la tensión aplicada en el circuito, la curva aumentará a un ritmo distinto. Sin embargo, el tiempo requerido por la corriente para alcanzar su nuevo máximo, se mantendrá constante. Las curvas de constantes de tiempo tienen para todos los circuitos inductivos la misma forma, aunque el tiempo total requerido por las corrientes para alcanzar su máximo valor, puede variar en circuitos distintos.

Las constantes de tiempo de un circuito inductivo son las mismas, ya sea para una caída o un aumento de corriente, siempre dentro de un mismo circuito. Véase en la parte B de la figura 9-9, la curva de caída para el ejemplo presentado anteriormente. Se puede apreciar que esta curva es la inversa de la curva de aumento de corriente ilustrada en la parte A de la figura. Nótese que en el primer intervalo R-L la corriente disminuye en un 63,2 % de su valor máximo. El valor de esta corriente puede determinarse como sigue:

$$I_{1R\text{-}L} = I_{max.} - (63{,}2\,\% \times I_{max.})$$
$$= 10 - (0{,}632 \times 10)$$
$$= 10 - 6{,}32$$
$$I_{1R\text{-}L} = 3{,}68 \text{ ampere}$$

La corriente decrece un 63,2 % de 3,68 ampere durante el segundo tiempo R-L, y en consecuencia a 0,4 segundos (punto b), la corriente en el circuito es de 3,68 ampere menos el 63,2 % de este valor, o sea 1,34 ampere. La corriente decrece otro 63,2 % durante el tercer período de tiempo R-L, a un valor de 0,49 ampere (punto c en la parte B de la figura 9-9). Durante el intervalo de tiempo 4 R-L, la corriente decrece a 0,18 ampere (punto d), y a 0,07 ampere (punto e) durante el intervalo de tiempo 5 R-L. En consecuencia, después de un segundo entero, la corriente ha disminuido de su valor máximo a un valor prácticamente cero. Se debe recordar que la corriente ha aumentado de cero a un valor máximo de 10 ampere, en el mismo período de tiempo. El aumento retardado de la corriente en un inductor, tiene uso práctico en aplicaciones tales como relés de tiempo, y circuitos para arranque de equipos.

Desarrollo de altas tensiones inducidas

Se ha demostrado que un inductor en el cual hay una corriente variable se convierte en una fuente de f.e.m. inducida, y que la dirección de la misma es tal que tiende a oponerse al cambio de la corriente que la produce.

Como resultado de esta acción, la corriente en el inductor no aumenta a su valor total en el instante en que se cierra la llave, sino que aumenta a un ritmo que depende de la inductancia y resistencia del circuito. En forma similar, cuando se abre la llave y se establece un corto circuito a través del mismo, la corriente de tal circuito no cae

instantáneamente a cero; cae en forma lenta a un ritmo similar al del aumento.

Los circuitos considerados hasta el presente han sido los del inductor ideal, en el cual no hay pérdidas y también el inductor que se utiliza en la práctica. Han sido analizados asimismo, el aumento y la disminución de la corriente; sin embargo, no se ha mencionado la tensión inducida en el *instante* en que se abre la llave. Como las magnitudes de las tensiones autoinducidas pueden ser extremadamente altas, aunque sea pequeña la fuente de tensión, se estudiará ahora el desarrollo de altas tensiones inducidas cuando se abre repentinamente un circuito inductivo.

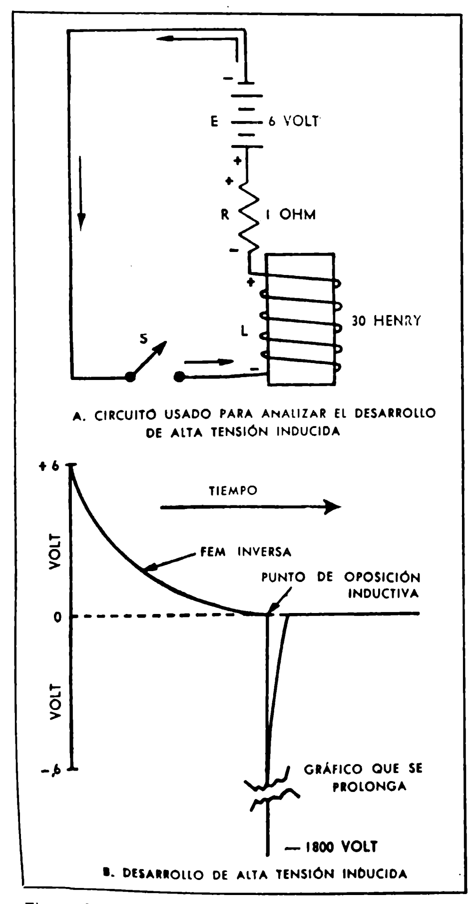


Figura 9-10. Análisis del desarrollo de altas tensiones inducidas

Véase el circuito mostrado en la parte A de la figura 9-10, consistente en una batería de 6 volt, una llave y una bobina de 30 henrio. El resistor (R) representa la resistencia total del circuito, incluyendo la de la bobina. En el instante en que se cierra la llave (tiempo 0), aparecerán 6 volt de f.e.m. inducida a través de la bobina, y la corriente comenzará a aumentar a partir de cero (véase la parte B de la figura). En ese momento no hay caída de tensión a través del resistor puesto que la f.e.m. inducida es igual a la tensión aplicada por la batería de 6 volt. Dado que la inductancia es de 30 henry, el ritmo inicial de variación de la corriente es de 1/5 de ampere por segundo.

Después de un intervalo de tiempo determinado por la inductancia y resistencia del circuito, la corriente ha aumentado a su valor final estable. En este ejemplo la corriente alcanza su estabilidad en 150 segundos, y el campo magnético alrededor de la bobina estará estabilizado totalmente. Si se abre ahora la llave, un lado de la batería estará desconectado y no habrá un paso completo por donde pueda fluir la corriente; y como resultado, la corriente provista por la batería cesa inmediatamente. Sin embargo, la inductancia en la bobina se opone a este cambio, y puesto que cesa la corriente alimentada por la batería para mantener el campo magnético, éste comenzará a desaparecer. A medida que desaparece, las líneas magnéticas de fuerza cortan las espiras de la bobina. Asimismo, las léneas de fuerza en expansión inducen una f.e.m. con la polaridad que se muestra en la parte A de la figura 9-10, y las líneas de fuerza que van desapareciendo producen una f.e.m. de polaridad opuesta. En consecuencia, la inductancia actúa como una fuente de tensión que tiende a mantener el flujo de la corriente en el circuito, tal como si todavía estuviera conectada la batería. Dado que la llave abierta representa una resistencia de valor muy alto, la constante de tiempo R-L del circuito es muy pequeña. Esto significa que el ritmo de caída de corriente es mucho mayor que el de aumento. Utilizando la fórmula para determinar la fuerza electromotriz inducida de un inductor, se puede calcular la tensión de la bobina. Si se supone que hay una caída de un décimo de segundo, la tensión desarrollada por el campo que desaparece será:

$$E = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

$$= 30 \frac{6}{0{,}1}$$

$$E = 1.800 \text{ volt.}$$

La energía contenida en el campo magnético que desaparece debe disiparse en alguna parte del circuito. La tensión desarrollada dentro del inductor es suficiente para crear un arco a través de los contactos del circuito, y la energía del campo se disipa en el calor de este arco.

La alta tensión inducida desarrollada de esta manera, se llama chispa de ruptura del circuito o tensión de corte. La energía gastada en el arco puede quemar seriamente a una persona, estropear los contactos de la llave, o romper la aislación de la bobina. Por esta razón, circuitos tales como el arrollamiento del campo de generadores y motores, nunca deben ser abiertos en forma rápida, de esta manera. Este método para crear una alta tensión a partir de una fuente de 6 ó 12 volt, tiene sus ventajas y aplicaciones, siendo la principal la utilización en los circuitos de bobina a chispa (sistemas de ignición), prácticamente de todos los motores a nafta. Un factor muy importante de los circuitos inductivos prácticos que hay que recordar, es que la chispa de ruptura estará presente, siempre que la corriente por el inductor sea interrumpida completamente o invertida en un tiempo menor que el tiempo de caída.

9-4 INDUCTANCIA MUTUA

Ya se ha explicado que cuando fluye una corriente por una bobina, el flujo producido une las vueltas de la misma, y que cuando ocurre un cambio en la corriente, el cambio correspondiente de flujo induce una tensión en la bobina. Si se coloca una segunda bobina, no conectada a una fuente de tensión, cerca de la bobina conductora de corriente, y ambas se orientan de tal manera que parte del flujo producido por la primera envuelva las vueltas de la segunda, cualquier cambio en el flujo de la primera inducirá una tensión en la segunda bobina. Cuando dos bobinas se colocan de esta forma, aparece una propiedad conocida como *inductancia mutua*. La inductancia mutua, en consecuencia, es la producción de una tensión dentro de un circuito, como resultado de haberse cortado el mismo por el campo magnético variable de un circuito cercano. La inductancia mutua es similar a la autoinductancia, pero se diferencian en que mientras la autoinductancia es la inductancia de una única bobina, la inductancia mutua es la que existe entre dos bobinas que actúan juntas.

Principios de inducción mutua

Siempre que hay una inducción mutua entre dos inductores, un cambio de corriente en uno de los mismos induce una tensión en el otro. Véase la parte A de la figura 9-11 que muestra dos inductores, L_1 y L_2, y sus resistencias internas asociadas: R_1 y R_2 respectivamente. El inductor L_1 se conecta a una fuente de tensión, la batería E_B, que produce un flujo de corriente a través del circuito. Nótese que el resistor R_S está en cortocircuito cuando se ha cerrado S_1. El inductor L_2 no está en un circuito completo porque la llave S_2 está abierta. En consecuencia, en este momento, no habrá flujo de corriente a través de L_2. Al inductor L_1 se lo llama arrollamiento *primario* y al segundo (L_2), se lo llama arrollamiento *secundario*. A esta disposición de inductores generalmente se la designa con el nombre de *transformador*. En esta sección no se estudiarán todos los aspectos del trabajo del transformador, pues el funcionamiento del mismo se entenderá mejor después de haber visto y comprendido los circuitos de corriente alternada. Sin embargo, lo estudiado sobre la inducción mutua es una información elemental necesaria para los futuros estudios.

Cuando se ha cerrado la llave S_1, la corriente fluye del terminal negativo de la fuente de tensión E_B, a través de la llave S_1, y el inductor L_1, al terminal positivo de la fuente de tensión. La corriente variable a través de L_1 produce un campo magnético que se expande alrededor de este inductor, y las líneas de fuerza resultantes cortan L_2, así como también las espiras adyacentes de L_1. Las líneas variables de fuerza inducen una tensión (f.e.m. inducida) en el inductor L_1 por autoinducción, y también inducen una tensión en el inductor L_2 por inducción mutua. Puesto que los terminales del inductor L_2 no han sido conectados, no puede fluir corriente por el mismo y, en consecuencia, L_2 no produce un campo magnético. Luego, en la parte A de la figura 9-11, solamente el inductor L_1 produce un campo magnético, y la tensión autoinducida en L_1 es la misma que si no estuviera presente L_2.

Ahora considérese el caso en que el circuito del inductor L_2 se completa cerrando la llave S_2 (parte B de la figura 9-11). Se debe recordar que la acción a ser descrita ahora, ocurrirá sólo durante el intervalo de tiempo en que la corriente a través de L_1 está aumentando (cambiando) de cero a su valor máximo. Cuando se ha cerrado la llave S_1, la corriente fluye por el inductor L_1 en el sentido indicado por las flechas, produciendo un campo magnético tal como se muestra en la figura. La corriente variable en L_1 hace que se expandan las líneas de flujo y se induzca una tensión en L_2. Debido a esta tensión indu-

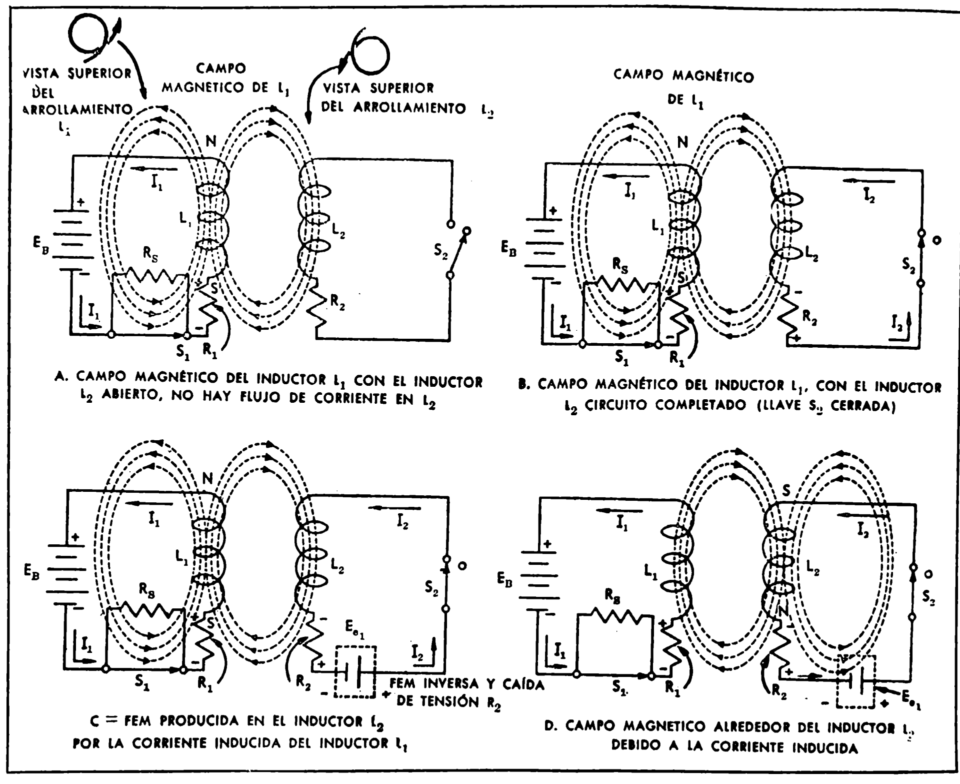


Figura 9-11. Campo y corrientes resultantes debido a la inducción mutua

cida en L_2, se produce un flujo de corriente por dicha bobina.

La dirección del flujo de la corriente en L_2, como se ha determinado por la ley de la mano izquierda para generadores, será como se indica en la parte B de la figura. Esta corriente en L_2, desarrolla una tensión a través de la resistencia (R_2) del inductor L_2. En forma similar, provoca una f.e.m. inducida a través de este inductor. La f.e.m. inducida en L_2, y la tensión desarrollada a través de la resistencia interna R_2, están en oposición a la tensión inducida en L_2 por L_1. Estas tensiones opuestas tienden a reducir el flujo de corriente por esta parte del circuito. La f.e.m. inducida y las tensiones de la resistencia interna pueden representarse por una fuente de tensión equivalente. Esta fuente (E_{e1}), y su polaridad, han sido indicadas por el bloque punteado en la parte C de la figura. Es importante que se observe la polaridad de esta fuente de tensión.

Como ejemplo, supóngase que la tensión inducida en L_2 por L_1 es 10 volt, y la suma de las tensiones opuestas (E_{e1}) es 3 volt. Puesto que 3 volt se oponen a 10 volt, el resultado neto es que restan solamente 7 volt a través del inductor L_2.

La corriente que fluye por L_2 genera un campo magnético alrededor del mismo; el sentido de este campo será como se ha indicado en la porte D de la figura 9-11. Nótese que el sentido del campo de L_2 que se une a L_1 es la misma que aquélla de L_1 a L_2. Compárese las partes C y D de la figura 9-11. Como resultado de la ayuda mutua de los campos magnéticos en L1, el flujo de la corriente en este inductor tenderá a

aumentar y, en consecuencia, refuerza el campo magnético generado por L_1. Sin embargo, la tensión a través del circuito de L_1 debe ser siempre igual a la tensión aplicada E_a. La manera en la cual las caídas de tensión se mantienen en el circuito que contiene a L_1 se ve en la siguiente explicación. Puesto que la tensión inducida en L_1 por L_2 ayuda al flujo de la corriente en el circuito de L_1, la f.e.m. inducida producida en L_2 aumentará.

$$e = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

Este aumento de f.e.m. inducida reduce efectivamente el flujo de la corriente y la caída de tensión en L_1. Esta igualdad entre la f.e.m. inducida y la f.e.m. de L1 será mantenida durante el intervalo de tiempo en que la corriente a través de L_1 está aumentando de 0 a su valor máximo. La corriente fluirá en L_2 sólo durante este intervalo de tiempo. Cuando la corriente en L_1 alcance a su valor máximo, se mantendrá constante y el campo magnético que circunda el inductor será el máximo y estará estabilizado. Entonces cesará el flujo de corriente en L_2.

Si la corriente a través de L_1 disminuye, el campo magnético desaparecerá parcialmente. Parte de la energía que se almacenó en el campo magnético debido al flujo de la máxima corriente, será devuelta entonces al circuito. Al abrir la llave S_1 se coloca a R_s en el circuito; la resistencia adicional decrece la corriente en el circuito, haciendo que disminuya en intensidad el campo alrededor de L_1. El sentido de la corriente inducida en L_1 por el campo magnético que desaparece, será del mismo sentido que el del flujo de corriente inicial. Es decir, que el refuerzo de corriente producido por el campo magnético que se extingue, se opone a la disminución en el flujo de la corriente causada por el aumento de la resistencia.

El campo magnético que desaparece también cortará las espiras del inductor L_2 induciendo una tensión en L_2, con un sentido opuesto a aquél que tenía el campo cuando se expandía. La corriente inducida en el circuito de L_2 induce una tensión en L_1 la cual es opuesta a la tensión autoinducida de L_1. El resultado es una reducción en los efectos del retardo en la disminución de corriente a través de L_1 que provocara el campo magnético que desaparece.

Como se ha visto, se han explicado las tensiones y corrientes provocadas por autoinducción e inducción mutua. Estas tensiones y corrientes inducidas dependen de los efectos del cambio del flujo magnético. Se debe destacar que no todas las líneas de fuerza producidas por las dos bobinas, L_1 y L_2 tienen inducción efectiva. Algunas de las líneas del flujo son clasificadas como *pérdida de flujo*. La figura 9-12 ilustra todas las líneas de flujo entre dos inductores.

Se debe recordar que siempre que hay una inductancia mutua entre dos inductores, el cambio de flujo de corriente dentro de uno de ellos induce una tensión en el otro. La polaridad de las tensiones inducidas depende de la forma en que han sido arrolladas las bobinas (sentido de las vueltas).

Magnitud de la tensión inducida

La tensión inducida en una bobina por inducción mutua es la suma de las tensiones inducidas en las vueltas separadas de la bobina. Cuanto más grande el número de vueltas de la bobina, más grande será la tensión inducida. Asimismo, la cantidad de flujo que une la bobina y el ritmo mediante el cual este flujo está variando, tiene influencia en la magnitud de la tensión inducida.

Del mismo modo que con la autoinductancia, la inductancia mutua también se mide en henrio, definido por la tensión producida por un cambio específico de corriente. Sin embargo, para la inductancia mutua la tensión es inducida en una segunda bobina (secundaria), por una corriente variable en la primera bobina (primaria). En consecuencia, la inductancia mutua entre dos bobinas es de un henrio cuando un cambio de corriente de 1 ampere por segundo en la primaria, induce una tensión de 1 volt en la secundaria. Esta relación se expresa matemáticamente así:

$$M = \frac{e}{\Delta i/\Delta t} \qquad (9\text{-}8)$$

donde:

M = inductancia mutua en henrio
e = tensión inducida en el secundario, en volt
$\Delta i/\Delta t$ = ritmo de cambio de corriente en el primario en amp/seg.

Por ejemplo: Si para una corriente en L_1 que varía de 4 a 8 ampere en un segundo, lo que significa un ritmo de cambio de 4 ampere por segundo, la tensión inducida en L_2 es de 12 volt, la inductancia mutua es de 3 henrio. Para resolver este problema sustitúyase todos los valores conocidos en la ecuación vista en (9-8), y luego resuélvase para M. Por lo tanto:

$$M = \frac{e}{\Delta i/\Delta t}$$
$$= \frac{12}{4}$$
$$M = 3 \text{ henrio}$$

Si se conoce el ritmo de cambio de la corriente en L_1 y la inductancia mutua, se puede determinar la tensión inducida en L_2 reordenando la ecuación precedente,

$$e = M \frac{\Delta i}{\Delta t} \qquad (9\text{-}9)$$

cuyos factores ya se han definido.

Esta ecuación es muy útil pues indica el valor de la tensión inducida en el secundario de dos circuitos acoplados magnéticamente. Ejemplo: si la inductancia mutua entre dos bobinas es 8 henrios, y la corriente a través de L_1 varía de 2 a 4 ampere por segundo, la tensión inducida será:

$$e = M \frac{\Delta i}{\Delta t}$$
$$= 8 \times 2$$
$$e = 16 \text{ volt}$$

La ecuación también muestra que un aumento, ya sea en la inductancia mutua o en el ritmo de cambio de corriente en la primaria, provocará un aumento en la tensión inducida en la secundaria.

Factores que afectan la inductancia mutua

Puesto que la inductancia mutua es tan importante para determinar la magnitud de la tensión inducida en un inductor por otro, se analizan a continuación los factores que la afectan.

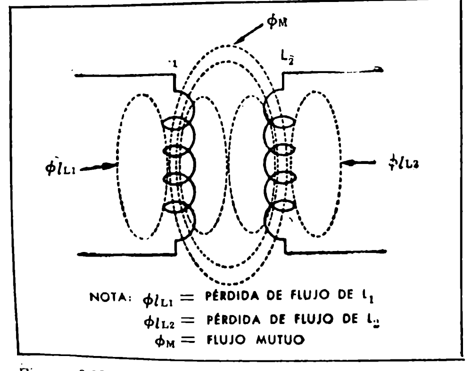


Figura 9-12. *Componentes del flujo circundando a los inductores L_1 y L_2*

Estos factores son: el número de vueltas del inductor L_1; el número de vueltas del inductor L_2; la posición relativa de los dos inductores y la permeabilidad del medio entre los mismos.

Los primeros dos factores son comprensibles, puesto que la cantidad de vueltas afecta la cantidad de tensión inducida para un cambio determinado de corriente. Si se recuerda la ecuación usada para determinar la magnitud de la tensión autoinducida ($e = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$), y la ecuación utilizada para determinar el valor de autoinductancia ($L = \frac{1{,}26\,\mu\,A\,N^2}{l \times 10^8}$), es evidente que el número de vueltas en cada bobina afecta la inductancia mutua.

El tercer factor, las posiciones relativas de las dos bobinas, puede ser entendido viendo la figura 9-13. Considérese las bobinas en la parte A y B de la figura. Las cuatro bobinas tienen la misma inductancia, pero las bobinas de la parte B de la figura están más espaciadas que las de la parte A. Si el ritmo de cambio de corriente que fluye por L_1 es igual en la parte A y en la parte B de la figura (supóngase 1 a 5 ampere por segundo), habrá más líneas de flujo que cortan a L_2 en la parte A que las que lo cortan en la parte B. Esto es verdad, pues la fuerza del campo magnético alrededor de una bobina decrece cuando la distancia de la bobina aumenta, y cuanto más fuerte sea el campo magnético, más grande será la densidad del flujo. En consecuencia, la tensión inducida en la parte A es mayor que en la parte B. Puesto que la tensión inducida en L_2 para un cambio de corriente específico en L_1 es la medida de inductancia mutua, se deduce que la inductancia mutua entre dos bobinas paralelas es mayor cuanto más próximas están. Si el inductor L_2 es perpendicular a L_1, como se muestra en la parte C de la figura 9-13, no habrá inducción de tensión en L_2, y, en consecuencia, la inductancia mutua entre los dos inductores es igual a cero. La razón es obvia, pues como L_2 es perpendicular a L_1, no hay líneas magnéticas de fuerza de L_1 que puedan cortar las vueltas del inductor L_2, y en consecuencia, no puede haber inducción de tensión en L_2.

El cuarto factor que afecta la magnitud de la inductancia mutua es la permeabilidad magnética del medio existente entre las dos bobinas. Se debe recordar que la permeabilidad de un material es el cociente entre el número de líneas de flujo que pasan por un espacio dado, cuando ese espacio es ocupado por ese material y el número de líneas de flujo que pasan por ese espa-

CAMPO MAGNÉTICO

L_1 L_2

A. INDUCTORES CERCANOS, GRAN INDUCTANCIA MUTUA

CAMPO MAGNÉTICO

L_1 L_2

B. INDUCTORES SEPARADOS, INDUCTANCIA MUTUA PEQUEÑA

CAMPO MAGNÉTICO

L_1 L_2

C. INDUCTOR L_2 PERPENDICULAR A L_1, NO HAY INDUCTANCIA MUTUA

Figura 9-13. Cómo es afectada la inductancia mutua por la relación física entre dos inductores

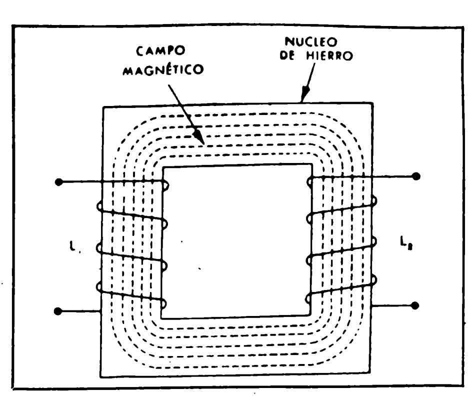


Figura 9-14. Uso de un núcleo de hierro para aumentar la inductancia mutua

cio, cuando es ocupado por aire. La figura 9-14 muestra dos inductores (L_1 y L_2) arrollados alrededor de un núcleo de hierro con una permeabilidad de 2000. Como resultado tenemos que prácticamente todas las líneas de flujo, debido al flujo de corriente en L pasarán por el núcleo de hierro, en lugar de pasar por el aire, que tiene una reluctancia 2000 veces mayor que el hierro. Puesto que L_2 está devanado alrededor de un núcleo de hierro, todas las líneas de flujo pasan por el mismo, formando un campo magnético muy potente.

Coeficiente de acoplamiento

Uno de los métodos empleados comúnmente para transferir energía de un circuito a otro, es utilizar la inductancia mutua entre dos bobinas. La cantidad de energía transferida depende de la cantidad de flujo magnético creado en las dos bobinas. No se debe cometer el error de creer que se obtendrá una mayor transferencia de energía si todo el flujo creado por L_1 corta las espiras de L_2. Lógicamente, tan pronto como comienza a fluir la corriente por L_2, producirá su propio flujo que inducirá una tensión en L_1 tendiente a oponerse a la corriente en L_1. Como consecuencia de esta interacción entre L_1 y L_2, la cantidad de energía transferida dependerá mucho del grado de acoplamiento de L_2 a L_1, que no tiene que ser necesariamente igual al grado de acoplamiento de L_1 a L_2. El grado de acoplamiento, comúnmente llamado coeficiente de acoplamiento, se expresa generalmente como un porcentaje y es designado con la letra K.

Véanse las figuras 9-12 y 9-15, para apreciar

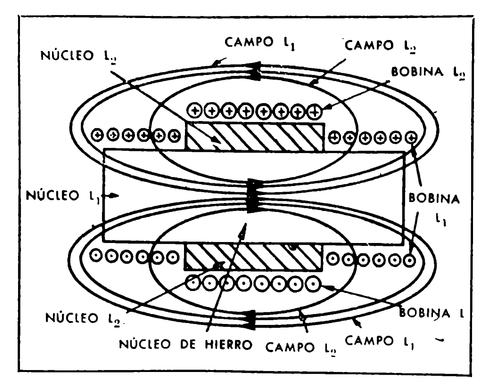


Figura 9-15. La conjunción de flujos determina el coeficiente de acoplamiento

que no siempre los grados de acoplamiento son iguales. En la figura 9-15, todas las líneas de flujo producidas por el inductor L_1 envuelven todas las vueltas del inductor L_2; pero no todas las líneas de flujo producidas por el inductor L_2 envuelven todas las vueltas del inductor L_1. En consecuencia, el acoplamiento de L_1 a L_2 no es igual al de L_2 a L_1. Se obtiene el acoplamiento máximo cuando todo el flujo producido por L_1 envuelve a todas las espiras de L_2 y viceversa. En este caso se dice que el coeficiente de acoplamiento es del 100 % o unitario. En la práctica, sin embargo, es imposible obtener el coeficiente de acoplamiento unitario, pero, igualmente por medio del uso de un núcleo de hierro, tal como aquél mostrado en la figura 9-14, se pueden obtener acoplamientos de hasta 98 %. El coeficiente de acoplamiento entre dos inductores se puede determinar por medio del uso de la siguiente expresión:

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \qquad (9\text{-}10)$$

donde:

K = coeficiente de acoplamiento expresado como un decimal
M = inductancia mutua de los dos circuitos, en henrio
L_1 = autoinductancia de la bobina L_1, en henrio
L_2 = autoinductancia de la bobina L_2, en henrio.

Para dos bobinas cuya inductancia mutua es de 1,5 henrio, y cuyas autoinductancias son 1,8 y 2 henrio, respectivamente, el coeficiente de acoplamiento será de 0,79 o sea un 79 %. La solución fue hallada de la siguiente manera:

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

$$= \frac{1,5}{\sqrt{1,8 \times 2}}$$

$$K = 0,79 \text{ ó } 79\,\%$$

Mediante transformación de la ecuación, se puede obtener la inductancia mutua cuando se conocen el coeficiente de acoplamiento entre dos bobinas y sus autoinductancias. Entonces la ecuación será:

$$M = K\sqrt{L_1 L_2} \qquad (9\text{-}11)$$

donde todos los términos son como se han definido anteriormente.

Recuérdese la ecuación utilizada para determinar la magnitud de la tensión inducida en L_2 cuando se disponen dos bobinas como en la parte A de la figura 9-13. De esta ecuación, $e = M\dfrac{\Delta i}{\Delta t}$ se notará que la magnitud de la tensión inducida en L_2 depende de la inductancia mutua entre las bobinas. Puesto que la inductancia mutua es afectada por el coeficiente de acoplamiento, cualquier cambio en dicho coeficiente también afecta la tensión inducida en L_2 por L_1. Cuando el coeficiente es bajo, sólo se induce una pequeña cantidad de tensión de L_1 a L_2, y, en consecuencia, la energía transferida a L_2 de L_1 es también pequeña. La relación entre el coeficiente de acoplamiento y la energía transferida a un inductor por otro debe ser evidente ahora.

9-5 INDUCTORES CONECTADOS EN SERIE Y EN PARALELO

La inductancia ha sido definida como aquella propiedad de un circuito que se opone a un *cambio* en la magnitud de la corriente que fluye por el mismo. Anteriormente se definió el término resistencia como la oposición de un circuito al paso de una corriente por el mismo. En el capítulo 4 se estudiaron los circuitos con resistencias conectadas en serie y en paralelo, y también se vieron los problemas esenciales y las ecuaciones usadas para resolverlos. Los métodos usados para determinar la resistencia total en los casos de resistencias conectadas en serie o en paralelo, pueden también emplearse para re-

solver la inductancia total de inductores conectados en serie o en paralelo.

Inductores conectados en serie

Los circuitos electrón cos contienen, por lo general, varios inductores conectados en serie. Cuando se conectan de esta manera, cada uno ayuda en la oposición a cualquier cambio dė la corriente. Por estar conectados en serie, la corriente que fluye por cada conductor será la misma. En consecuencia, puesto que se puede aplicar las leyes de Kirchhoff de tensión tanto a circuitos resistivos como inductivos, la suma de las caídas de tensión a través de los inductores individuales en serie será igual a la tensión aplicada al circuito. La parte A de la figura 9-16 muestra un circuito con los inductores L_1, L_2 y L_3 conectados en serie y sin inductancia mutua. Para determinar la inductancia total equivalente de este circuito, súmense sencillamente las inductancias individuales.

$$L_t = L_1 + L_2 + L_3 \qquad (9\text{-}12)$$

Es importante recordar que esta ecuación se aplica sólo donde no hay acoplamiento magnético entre los inductores.

Cuando hay acoplamiento magnético entre los inductores, la ecuación arriba mencionada debe modificarse, puesto que la inductancia total ahora será más grande o más pequeña, dependiendo de que los campos magnéticos de los dos inductores tengan un mismo sentido o sentido opuesto. El efecto del acoplamiento magnético es agregar inductancia mutua a la inductancia total en serie, o sustraerla.

Considérese primero el caso de dos inductores conectados en serie con sus campos ayudándose mutuamente, como se muestra en la parte B de la figura 9-16. Para los inductores conectados de esta manera, la ecuación para determinar la inductancia total es:

$$L_t = (L_1 + K\sqrt{L_1 L_2}) + (L_2 + K\sqrt{L_1 L_2}) \qquad (9\text{-}13)$$

se simplifica y la ecuación se convierte:

$$L_t = L_1 + L_2 + 2K\sqrt{L_1 L_2}$$

donde todos los factores son iguales a los ya definidos. Se debe recordar, de la sección 9-4, que el factor $K\sqrt{L_1 L_2}$ es igual a la inductancia mutua (M) entre dos bobinas. En consecuencia, la ecuación arriba mencionada puede simplificarse así:

$$L_t = L_1 + L_2 + 2M \qquad (9\text{-}14)$$

donde 2M ahora representa 2 veces la inductancia mutua entre las bobinas. La inductancia total del

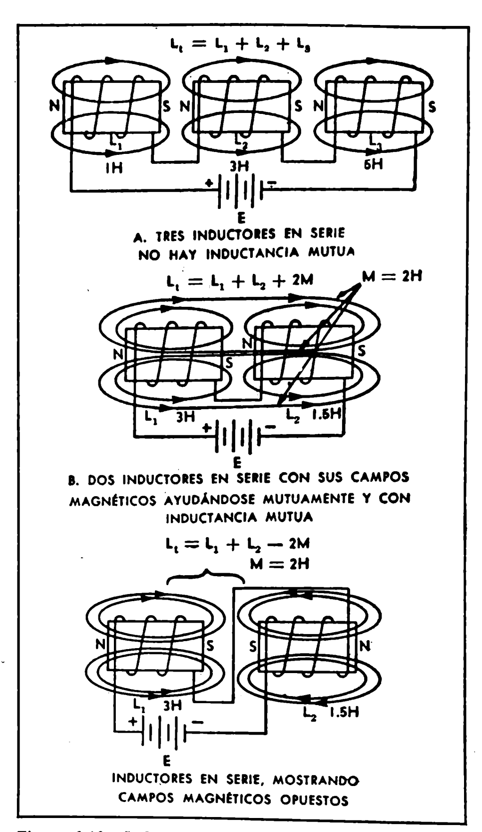


Figura 9-16. Inductores conectados en serie, mostrando inductancias mutuas y campos magnéticos

circuito mostrado en la parte B de la figura 9-16, se determina como sigue:

$$L_t = L_1 + L_2 + 2M$$
$$= 3 + 1{,}5 + (2 \times 2)$$
$$L_t = 8{,}5 \text{ henrio}$$

A continuación se verá el caso de dos inductores conectados en serie arrollados de tal manera que sus campos magnéticos se opongan (parte C de la figura 9-16). Comparando las partes B y C de la figura se puede ver que el arrollamiento de L_2 en la parte B es contrario u opuesto al de L_2 en la parte C. En consecuencia, los campos magnéticos de los dos inductores en la parte C se oponen mutuamente. La ecuación utilizada para resolver

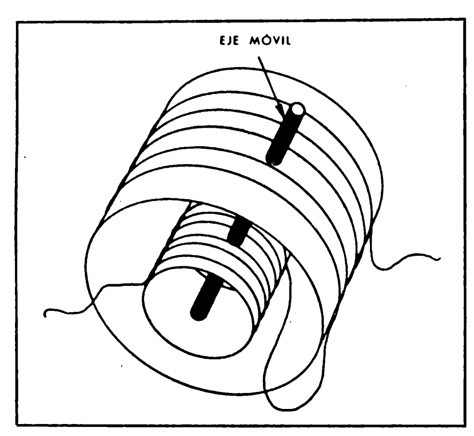


Figura 9-17. Inductor variable tipo (variómetro)

la inductancia total de tal circuito es la siguiente:

$$L_t = L_1 + L_2 - 2M \qquad (9\text{-}15)$$

donde los términos son iguales a los definidos anteriormente. El signo menos (—), que precede la inductancia mutua, indica que la inductancia del circuito total disminuye por el efecto de los campos magnéticos opuestos de L_1 y L_2. Si se supone que los valores de inductancia para L_1, L_2 y M son los indicados en la parte C de la figura 9-16, se puede determinar la inductancia total del circuito, o sea:

$$L_t = L_1 + L_2 - 2M$$
$$= 3 + 1{,}5 - (2 \times 2)$$
$$L_t = 0{,}5 \text{ henrio}$$

El hecho de que la inductancia total de dos inductores acoplados magnéticamente, conectados en serie, puede variarse haciendo que sus campos se ayuden o se opongan mutuamente, tiene aplicación en la construcción de un tipo de inductor variable llamado *variómetro*. Este aparato, que se ve en la figura 9-17, consiste generalmente en dos bobinas conectadas en serie y está construido de tal manera que una bobina puede ser girada dentro de la otra. Sus campos se oponen o se ayudan dependiendo ello de la posición relativa de una bobina con respecto a otra, y la inductancia total varía como se ha descrito más arriba.

Inductores conectados en paralelo

El procedimiento para hacer cálculos en circuitos con inductores conectados en paralelo, es similar a aquél utilizado para circuitos con resistencia también conectadas en paralelo. Cuando se conectan resistores en paralelo, el resistor de valor más pequeño elimina a las demás. La mayoría de la corriente del circuito fluye por esta pequeña resistencia puesto que ofrece el mínimo de oposición al flujo de la misma. En forma similar, cuando se conectan inductores en paralelo, como se muestra en la parte A de la figura 9-18, y la corriente en el circuito aumenta o disminuye, cada inductor se opone individualmente al cambio de corriente. La porción más grande de corriente elige entonces el camino que ofrece la mínima oposición, el cual es el de la mínima inductancia. Si no hay acoplamiento magnético entre los inductores conectados en paralelo, la recíproca de la inductancia total del circuito es igual a la suma de las recíprocas de las inductancias individuales. Esta ecuación expresada matemáticamente es la siguiente:

$$\frac{1}{L_t} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} \qquad (9\text{-}16)$$

Se sustituyen los valores dados en la parte A de la figura 9-18 en la ecuación y resolviendo, se encuentra que el circuito mostrado tiene una inductancia de 1 henrio. Este valor de inductancia es menor que el valor de la inductancia más pequeña del circuito. Para el caso de dos inductores en paralelo, sin inductancia mutua, se puede aplicar el método producto sobre suma, para determinar la inductancia efectiva del circuito.

$$L_t = \frac{L_1 \times L_2}{L_1 + L_2} \qquad (9\text{-}17)$$

Los métodos arriba mencionados para determinar la inductancia efectiva para inductores conectados en paralelo, sirven solamente cuando no hay acoplamiento magnético entre los mismos.

Cuando existe ese acoplamiento entre inductores conectados en paralelo, las ecuaciones precedentes deben modificarse para incluir la inductancia mutua entre las bobinas. La modificación depende de que los campos magnéticos se complementen o se opongan.

Considérese primero el caso de dos inductores conectados en paralelo cuyos campos magnéticos se complementan. Tal circuito se muestra en la parte B de la figura 9-18. Para los inductores conectados de esta manera, la ecuación recíproca para determinar la inductancia es:

$$L_t = \frac{1}{\dfrac{1}{L_1 + M} + \dfrac{1}{L_2 + M}} \qquad (9\text{-}18)$$

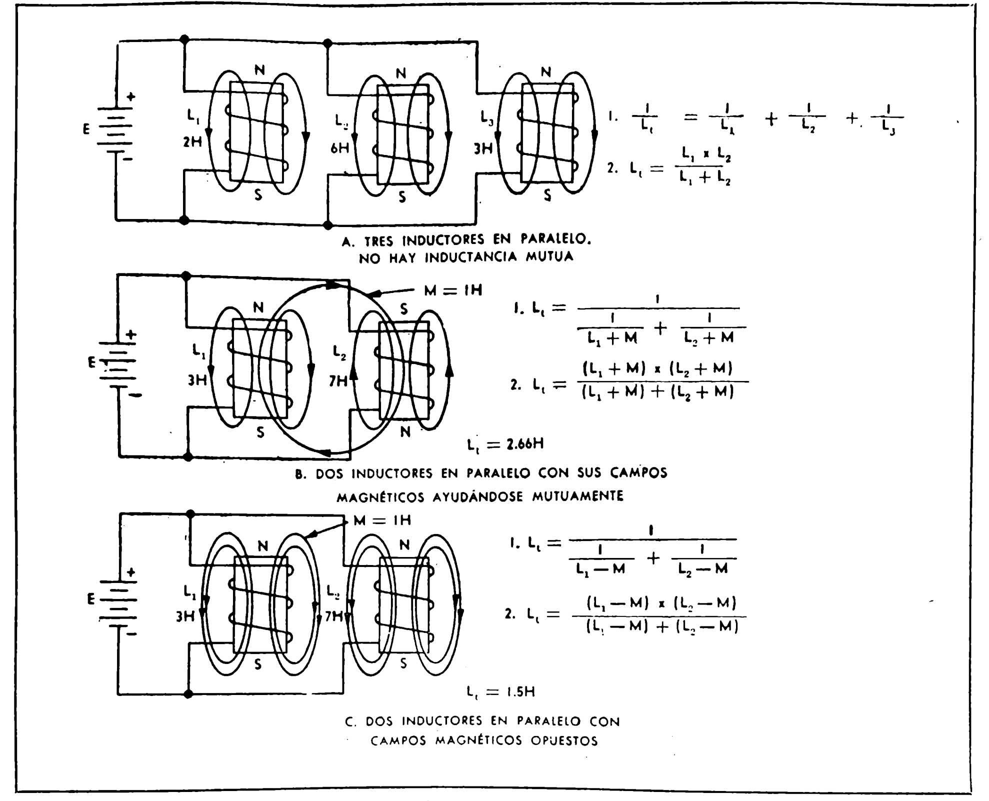


Figura 9-18. Inductores conectados en paralelo, mostrando sus inductancias mutuas y campos magnéticos

Si se suponen valores de inductancia de 3, 7, y 1 henrio para L_1, L_2 y M, respectivamente, la inductancia total del circuito indicado en la parte B de la figura es 2,66 henrio. Nótese que aunque los campos magnéticos se complementan, la inductancia total del circuito es todavía menor que el menor inductor conectado en paralelo. Esto es válido para todos los circuitos de inductores en paralelo. El método modificado de producto sobre suma está dado por la fórmula 2 de la parte B de la figura 9-18.

Se verá a continuación el caso en el cual se han arrollado dos inductores en paralelo de tal manera que sus campos magnéticos se oponen, como se muestra en la parte C de la fig. 9-18. Compárese las partes B y C de la figura 9-18, y se notará que el arrollamiento de L_2 en B es opuesto al de L_2 en la parte C. En consecuencia, los campos magnéticos de los dos inductores en la parte C se oponen. La ecuación recíproca es nuevamente válida para resolver la inductancia total de este circuito.

$$L_t = \frac{1}{\frac{1}{L_1 - M} + \frac{1}{L_2 - M}} \qquad (9\text{-}19)$$

El signo menos (—) que precede la inductancia mutua, indica que la inductancia total del circuito disminuye debido al efecto de los campos magnéticos que se oponen.

Si se supone que los valores de inductancia para

L_1, L_2 y M son los indicados en la figura, la totalidad de inductancia del circuito seráde 1,5 henrio. Al comparar la inductancia total calculada para el circuito con campos magnéticos que se complementan (2.66 H, parte B de la fig. 9-18), con la inductancia total calculada para el circuito de campos magnéticos que se oponen (1.5 H, parte C de la figura 9-18), se puede apreciar que la inductancia total es menor para el circuito con campos opuestos. En ambos casos la inductancia total del circuito es menor que el menor valor de inductancia individual (L_1, 3H).

El método producto sobre suma para calcular la inductancia total de inductores en paralelo, también puede aplicarse a un circuito cuyos campos magnéticos se oponen. La forma modificada de esta ecuación es la fórmula 2 en la parte C de la figura 9-18.

9-6 TIPOS DE CONSTRUCCIÓN DE INDUCTORES

En los equipos electrónicos, se utilizan los inductores con múltiples propósitos, tales como transferir energía de un circuito a otro, para la sintonía de circuitos resonantes o incrementos y disminuciones de tensión. Por esta razón los inductores se fabrican de muchas formas y tamaños, dependiendo del uso que se haga de ellos.

Hasta este momento, los inductores estudiados fueron del tipo de arrollamiento de una capa, con núcleo de aire o de hierro.

Se presentó la ecuación $L = \frac{1,26\,\mu\, AN^2}{l \times 10^8}$ para ilustrar cómo varios factores: permeabilidad sección, largo de núcleo, y número de espiras, afectan la inductancia de las bobinas. En la práctica, sin embargo, las dimensiones de los inductores rara vez satisfacen las condiciones requeridas por esta ecuación. Para calcular la inductancia de las diversas formas de bobinas más fácilmente, se clasifican éstas en cuatro grupos. Se puede obtener entonces una ecuación para cada grupo. La clasificación es la siguiente: bobinas de arrollamiento de capa única; de arrollamiento de capa múltiple; de arrollamiento en espiral plana; y arrollamiento toroidal. Las bobinas a ser estudiadas tendrán núcleos de aire; por lo tanto, las ecuaciones empleadas sólo serán útiles para este tipo de bobinas.

Bobina de capa única

El primer tipo de bobina a estudiarse será el de capa única, tal como se muestra en la sección axial de la figura 9-19. Este tipo de bobina se usa generalmente en solenoides y también en ciertos tipos de bobinas de choque. La ecuación

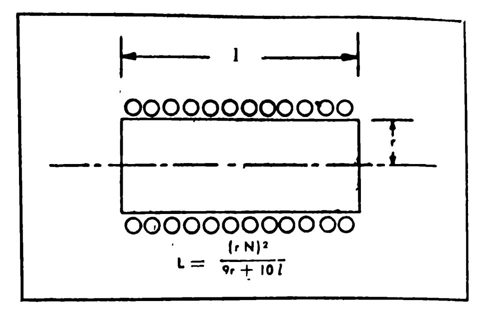


Figura 9-19. Vista axial del corte de un arrollamiento de una capa

utilizada para calcular la inductancia de este tipo de bobina es la siguiente:

$$L = \frac{(r\ N)^2}{9r + 10\ l} \qquad (9\text{-}20)$$

Donde

L = inductancia de la bobina en microhenrio
r = radio de la bobina en pulgadas
N = número total de vueltas de la bobina
l = largo de la bobina en pulgadas

Esta ecuación se utiliza en bobinas cuyo diámetro no excede en mucho a su largo. Como ejemplo, calcúlese la inductancia de una bobina de capa única de 100 vueltas de alambre, 2 pulgadas de largo y 0,8 pulgadas de radio.

Este cálculo se realiza de la siguiente forma:

$$L = \frac{(rN)^2}{9r + 10\ l}$$

$$= \frac{(0.8 \times 100)^2}{(9 \times 0.8) + (10 \times 2)}$$

$$L = 236 \times 10^{-6} \text{ henrio, o } 236 \text{ microhenrio}$$

Cuando se conocen la longitud y el radio de la bobina se puede determinar fácilmente el número de vueltas de alambre para producir el valor deseado de inductancia. Se transforma la ecuación y tenemos:

$$N \doteq \frac{\sqrt{L\ (9r + 10\ l)}}{r} \qquad (9\text{-}21)$$

Si se supone que la bobina tiene una longitud de 3 pulgadas, el radio de 1.25 y una inductancia deseada de 290 microhenrio, se encuentra que el número de vueltas requeridos por la bobina es de 87,5. Esto quiere decir que para una bobina de una capa de las dimensiones arriba mencionadas, el número de vueltas por pulgada de largo

TABLA 9-2. DATOS SOBRE BOBINAS Y ALAMBRES

Calibre	Número de vueltas por pulgada				Pies por libra	Pies por ohm
	Esmaltado	CSS	DCS CSA	DCA		
10	9.6		9.3	8.9	31.82	1001
11	10.7		10.3	9.8	40.12	794
12	12.0		11.5	10.9	50.59	629.6
13	13.5		12.8	12.0	63.80	499.3
14	15.0		14.2	13.8	80.44	396.0
15	16.8		15.8	14.7	101.4	314.0
16	18.9	18.9	17.9	16.4	127.9	249.0
17	21.2	21.2	19.9	18.1	161.3	197.5
18	23.6	23.6	22.0	19.8	203.4	156.5
19	26.4	26.4	24.4	21.8	256.5	124.2
20	29.4	29.4	27.0	23.8	323.4	98.5
21	33.1	32.7	29.8	26.0	407.8	78.11
22	37.0	36.5	34.1	30.0	514.2	61.95
23	41.3	40.6	37.6	31.6	648.4	49.13
24	46.3	45.3	41.5	35.6	817.7	38.96
25	51.7	50.4	45.6	38.6	1031	30.90
26	58.0	55.6	50.2	41.8	1300	24.50
27	64.9	61.5	55.0	45.0	1639	19.43
28	72.7	68.6	60.2	48.5	2067	15.41
29	81.6	74.8	65.4	51.8	2607	12.22
30	90.5	83.3	71.5	55.5	3287	9.691
31	101.0	92.0	77.5	59.2	4145	7.685
32	113	101	83.6	62.6	5227	6.095
33	127	110	90.3	66.3	6591	4.833
34	143	120	97.0	70.0	8310	3.833
35	158	132	104	73.5	10480	3.040
36	175	143	111	77.0	13210	2.411
37	198	154	118	80.3	16660	1.912
38	224	166	126	83.6	21010	1.516
39	248	181	133	86.6	26500	1.202
40	282	194	140	89.7	33410	0.9534

debe ser de 87.5/3, aproximadamente 29 vueltas por pulgada.

Un factor que no se ha incluido en la fórmula anterior para inductancia, es el tipo de alambre a usar en el arrollamiento de la bobina. Se debe considerar el diámetro para obtener el número justo de vueltas por pulgada, la resistencia de corriente continua, y en consecuencia satisfacer los requerimientos de la constante de tiempo R-L del inductor. La tabla 2 da el número de vueltas por pulgada lineal y los pies por ohm, para diferentes medidas de alambres con tipos de aislamiento normal. La tabla muestra, para el inductor que estamos considerando, que se pueden utilizar los siguientes tipos de alambres: Nº 20 esmaltado o cubierto de una capa de seda, Nº 21 doble capa de seda o capa simple de algodón, y el Nº 22 de doble capa de algodón. Si se ha elegido el Nº 20, el inductor tendrá una inductancia de 290 microhenrio, una resistencia de corriente continua de 0,591 ohm, y una constante de tiempo R-L de 503 microsegundos.

La resistencia de corriente continua de la bobina, se determina encontrando la circunferencia de la misma que dará la longitud necesaria de una vuelta:

$$C = \pi d$$
$$C = 3{,}1416 \times 2{,}5''$$
$$C = 7{,}85''$$

Puesto que se necesitan 87,5 vueltas para formar el inductor, la longitud total del alambre Nº 20 esmaltado será:

$$\text{Longitud total} = 87{,}5 \times 7{,}85''$$
$$\text{,,} \qquad \text{,,} = 676{,}77'' \text{ ó } 57{,}23 \text{ pies}$$

De la tabla Nº 9-2 se deduce que el alambre Nº 20 tiene una resistencia de un (1) ohm por 98,5 pies. En consecuencia, se puede establecer

una relación para determinar la resistencia de corriente continua del inductor de 290 microhenrio

$$\frac{98{,}5}{1} = \frac{57{,}23}{x}$$

$$98{,}5\ x = 57{,}23$$

$$x = \frac{57{,}23}{98{,}5}$$

$$x = 0{,}581 \text{ ohm}$$

La constante de tiempo puede determinarse como se explicó anteriormente, y se encontrará que es de 503 microsegundos.

Bobinas de capas múltiples, espirales planas y toroidales

Además de la bobina de capa única existen otras construidas de distintas formas. La más común de éstas es la de capas múltiples, mostrada en la figura 9-20, parte A. Este tipo de bobina encuentra un uso amplio en muchas aplicaciones de bobinas de choque y transformadores. La ecuación utilizada para calcular la inductancia de este tipo de bobinas es la siguiente:

$$L = \frac{0{,}8\ (r\ N)^2}{6\ r + 9\ l + 10\ b} \qquad (9\text{-}22)$$

L, r, N y l se han definido anteriormente.

b = profundidad de la bobina en pulgadas

Como problema, calcúlese la inductancia de una bobina de capas múltiples con las siguientes dimensiones: radio, 0,5 pulgada; largo, 2 pulgadas; profundidad 0,25 pulgada y 200 vueltas de alambre.

Cuando una bobina múltiple es muy corta, es decir, cuando su largo tiene sólo unas pocas vueltas de alambre se la llama arrollamiento espiral plano. Se puede apreciar este tipo de bobina en la parte B de la figura 9-20. Se fabrican por lo general con alambre rectangular o de tipo cinta, en lugar del circular. La ecuación para determinar la inductancia de una espiral plana es:

$$L = \frac{(r\ N)^2}{8\ r + 11\ b} \qquad (9\text{-}23)$$

donde todos los factores ya han sido definidos.

Como problema, calcúlese la inductancia de una bobina espiral plana de 50 vueltas de alambre, profundidad 0,25 pulgada y radio 0,5 pulgada.

Se debe recordar que la ecuación arriba mencionada sólo se emplea para bobinas con núcleo de aire. Cuando se utilizan núcleos de hierro, no se aplican estas ecuaciones. El diseño de inductores con núcleos de hierro depende de la forma de la bobina y del tipo de material utilizado en el núcleo. Generalmente, el núcleo de hierro de

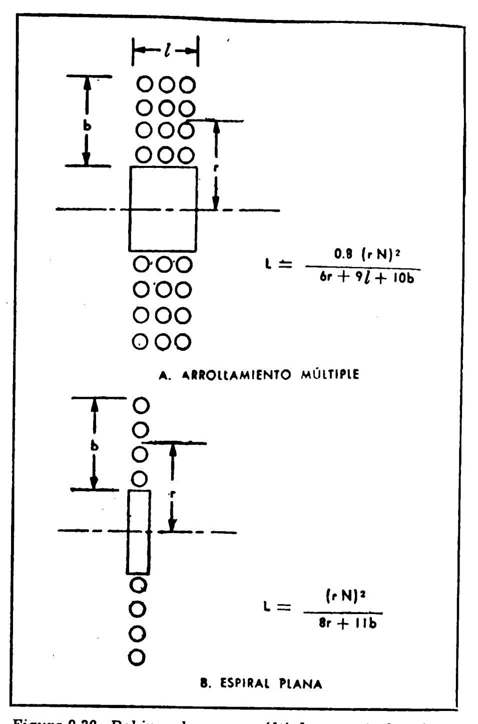


Figura 9-20. Bobinas de capas múltiples y espirales planas

las bobinas múltiples, espirales planas y de capas únicas, tiene la forma de tapón cilíndrico que llena el diámetro interno de la misma. En muchos casos el tapón es movible (a rosca o deslizable) para que se pueda variar la inductancia de la bobina.

Se llaman bobinas *toroidales* las que tienen núcleos cerrados rectangulares o circulares. El nombre deriva de anillo, que puede ser rectangular o circular como se muestra en las parte A y B de la figura 9-21. Las bobinas toroidales se utilizan en los sistemas de computadores automáticos o memorias, filtros de choque y en las bobinas de desviación en televisión y radar. Estas bobinas son arrolladas en una sola capa o en varias, dependiendo del uso para el cual han sido destinadas.

Arrollamientos no inductivos

Los efectos de la inductancia en los equipos electrónicos son muy útiles, y a menudo necesarios. Sin embargo, en casos especiales es desea-

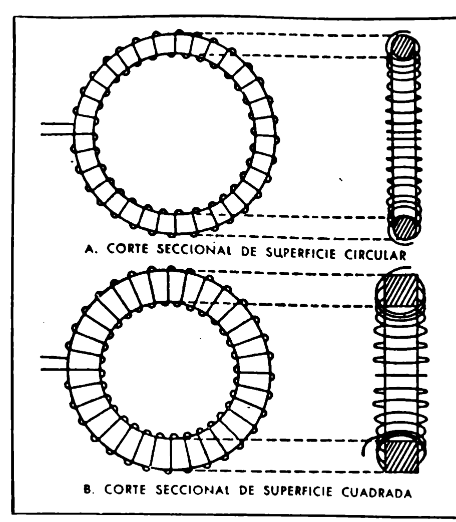


Figura 9-21. Arrollamientos de bobinas toroidales

ble poca o ninguna inductancia en los resistores de alambre de circuitos de precisión.

Para obtener el mínimo valor de inductancia en esas aplicaciones, el arrollamiento de la resistencia debe ser hecho de tal manera, que el efecto de inducción creado por una vuelta sea eliminado por la siguiente adyacente. Cuando se los arrolla de esta manera se dice que la bobina está arrollada de una manera no inductiva.

Un método para realizar una bobina no inductiva, sería primero doblar el alambre a ser usado en dos (parte A de la fig. 9-22), y comenzando con el doblez, efectuar las vueltas necesarias (figura 9-22 B). En las bobinas de este tipo la corriente fluye en un sentido por la mitad de la bobina y en sentido contrario por la otra mitad. El flujo en sentido contrario dentro de la misma bobina hace que se eliminen mutuamente los efectos de cada vuelta.

A veces una inductancia indeseable se origina en la corriente que fluye por los alambres que conectan partes de un equipo electrónico. Esto se produce en los filamentos de válvulas o circuitos de calefacción, que funcionen con corriente alternada. Si se doblan los alambres, o haciéndolos correr en dirección paralela, el efecto inductivo puede reducirse a una cantidad despreciable. El primer método (doblado), es el que se usa comúnmente en los filamentos o circuitos de calefacción de equipos electrónicos.

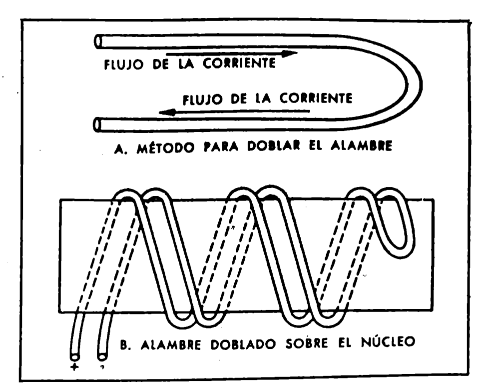


Figura 9-22. Arrollamiento no inductivo (inductor neutralizado)

9-7 APLICACIONES DE LOS INDUCTORES

Para mostrar el uso de los inductores se han mencionado algunas de sus aplicaciones. Éstas pueden ser agrupadas en las siguientes clases: choque o bobina de filtro, transformadores, circuitos sintonizados, relés, solenoides y aplicaciones especiales. En estas aplicaciones diversas variará el tamaño, el valor de la inductancia, el tipo de núcleo, etc. Por ejemplo, los inductores utilizados en los circuitos de baja frecuencia deben tener valores de inductancia más grandes que los de alta frecuencia, porque la corriente de un circuito de baja frecuencia cambia a un ritmo menor que la de alta frecuencia.

Bobinas de choque

Los inductores utilizados para prevenir cambios en la corriente de un circuito, originados por cambios en otra sección del equipo electrónico, se llaman bobinas de choque, bobinas de filtro, filtro de choque, o simplemente choques. El nombre choque se deriva de la aseveración de que el inductor se opone o bloquea el cambio de corriente; en consecuencia, evita que aparezca en otros circuitos.

Un ejemplo de la aplicación de una bobina de choque puede hallarse en la fuente de poder de la mayoría de los equipos electrónicos. La fuente de poder transforma o convierte la corriente alternada en una corriente continua pulsante (variable). El filtro de choque sirve para suavizar la corriente continua y pulsante y producir un valor casi constante de corriente continua. Puesto que las frecuencias de las pulsaciones son por lo general del orden de los 60 ó 120 ciclos por

segundo, los filtros o choques de la fuente de poder por lo común tienen valores de inductancia que varían de 5 a 30 henrio.

Los choques con estos altos valores de inductancia consisten, por lo general, en un gran número de vueltas de alambre arrolladas en un núcleo de hierro o aleación del mismo metal.

Transformadores

Al tratar la inductancia mutua se estudió que un transformador es la disposición de dos inductores para que la energía pueda ser transferida de uno a otro. Los mismos pueden consistir en más de dos inductores, según su aplicación.

Bobinas de arranque de automóviles

El automóvil de nuestros días ha sido posible gracias al invento del sistema de ignición del motor a nafta. Tal sistema, que funciona por el principio de inductancia mutua, se muestra en la figura 9-23. El eje principal controla un contactor que activa un juego de puntos que a su vez abren y cierran el circuito primario. Los puntos de separación actúan como una llave regulada y accionada mecánicamente, controlando el flujo de corriente por el arrollamiento primario de la bobina. Nótese que el arrollamiento primario está compuesto por unas pocas vueltas de alambre grueso, y el secundario se compone de muchas vueltas

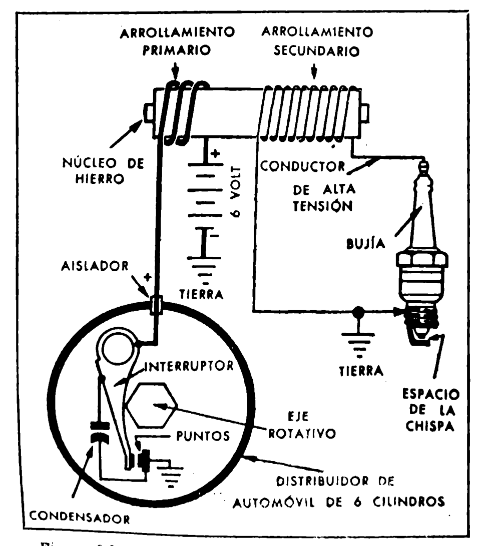


Figura 9-23. Sistema de encendido de un automóvil

de alambres, pero ambos alrededor de un mismo núcleo de hierro La bobina está diseñada para tener una alta inductancia mutua, que a su vez provoca una alta tensión a inducirse en el secundario.

Durante el tiempo que los puntos están cerrados, la batería de 6 volt alimenta una corriente por el primario, creando un campo magnético que se une al secundario. Cuando los puntos se abren por la rotación del contactor, se interrumpe repentinamente el flujo de la corriente por el primario, causando una rápida desaparición del campo magnético. Recordando la ecuación utilizada para determinar la tensión inducida en el arrollamiento secundario, $e = M\frac{\Delta i}{\Delta t}$ obsérvese que un rápido cambio de corriente en el primario inducirá una tensión muy alta en el secundario. Esta tensión puede ser de una magnitud de 10.000 a 50.000 volt, dependiendo del ritmo de cambio de corriente en el primario y del valor de la inductancia mutua en el circuito.

La alta tensión desarrollada de esta manera debe ser suficiente para saltar el espacio de la bujía (luz), y encender la mezcla aire nafta que hay en el motor. Aunque todavía no se ha estudiado el condensador, basta decir que el condensador a través de los puntos de contacto, sirve para ayudar a aumentar la velocidad de desaparición del campo magnético del arrollamiento primario y evitar chispas a través de los mismos.

9-8 RESUMEN

Inductancia es la propiedad de un circuito eléctrico que tiende a oponerse a cualquier cambio de corriente dentro del circuito, ya sea en aumento o en disminución. Los dispositivos agregados a un circuito con el propósito de introducir la propiedad de inductancia se llaman inductores.

La acción que produce el efecto de inductancia es la f.e.m. inducida. La f.e.m. inducida se origina en la expansión o contracción de las líneas magnéticas de flujo que cortan las vueltas adyacentes del inductor, a medida que la corriente variable pasa por el mismo. La propiedad de inductancia no existe si no hay una corriente variable a través de la bobina.

Cuando se coloca un inductor en un circuito de corriente continua, el aumento de la corriente del mismo sigue una curva exponencial. Las tensiones presentes en el circuito cuando aumenta la corriente son: la tensión aplicada, la fuerza electromotriz inducida y la caída de tensión a través de la resistencia total del circuito. El tiempo re-

querido para que aumente la corriente del circuito a su máximo valor, depende de la constante de tiempo R-L, o sea, la relación entre la inductancia del circuito y la resistencia del mismo. En el primer período R-L de tiempo, la corriente aumentará a un 63,2 % de su máximo valor posible. Si se abre o invierte repentinamente el flujo de la corriente por un circuito inductivo, puede provocarse el desarrollo de una alta tensión inducida. Este golpe inductivo es útil en algunas aplicaciones, así como puede ser peligroso para personas y para el buen estado del equipo.

Cuando se arreglan o combinan dos inductores de tal forma que el cambio del flujo de corriente en uno provoque la inducción de tensión en el otro, aparece una propiedad conocida como inductancia mutua. La inductancia mutua entre dos inductores es de un henrio, cuando el cambio de corriente de un ampere por segundo en la primera bobina induce una tensión de un volt en la segunda. La inductancia mutua entre dos inductores depende del número de vueltas de cada inductor, su posición relativa y la permeabilidad del medio que los separa. La inductancia total de varios inductores conectados en serie, es igual a la suma de las inductancias individuales, más o menos dos veces la inductancia mutua entre ambos (2M). La recíproca de la inductancia resultante de inductores conectados en paralelo, es igual a la suma de las recíprocas de las inductancias individuales, más o menos la inductancia mutua. Los inductores conectados en serie o en paralelo, siguen las mismas reglas que las resistores para determinar la inductancia total, con la salvedad de que se debe considerar la inductancia mutua cuando ella exista.

La apariencia física de los inductores de los equipos electrónicos varía de acuerdo con los requerimientos y aplicaciones para los cuales se confeccionan. Los mismos se pueden agrupar en clasificaciones tales como choques, bobinas de filtro o también se pueden clasificar por el tipo de arrollamiento utilizado. La función primaria de la propiedad de inductancia es la de oponerse a los cambios en la corriente, o la de suministrar energía al circuito en el instante deseado.

CUESTIONARIO

1. Defina los siguientes términos: a) inductancia; b) autoinductancia; c) inductor; d) henrio.
2. ¿Cuáles son los factores que determinan la inductancia de una bobina?
3. La energía eléctrica requerida para formar un campo magnético alrededor de una bobina se almacena en forma de ....
4. ¿Por qué la corriente en un circuito inductivo no aumenta inmediatamente a su valor final?
5. Se coloca un inductor conteniendo poca resistencia en un circuito de corriente continua que tiene una batería y una llave. Cuando se cierra la llave, la corriente por el inductor (elíjase un punto):
   a. caerá linealmente con el tiempo
   b. aumentará linealmente con el tiempo
   c. aumentará a un ritmo que decrece con el tiempo
   d. decrecerá a un ritmo que aumenta con el tiempo
6. En un circuito inductivo ¿cuál es la ecuación que da la relación entre la caída de tensión (caída IR) a través de la resistencia, la tensión inducida y la tensión aplicada?
7. ¿Cómo, aumentando la inductancia en un circuito inductivo, se afecta el ritmo por el cual aumenta la corriente?
8. Si en un circuito inductivo se aumenta la inductancia ¿aumentará, disminuirá o se mantendrá constante el ritmo por el cual decrece la corriente?
9. Dibuje lo siguiente:
   a. Una curva para demostrar cómo aumenta la corriente en un circuito inductivo
   b. Una curva para demostrar cómo disminuye la corriente en el mismo circuito.
10. Explique el significado de la constante de tiempo R-L.
11. ¿Cuál es la constante de tiempo R-L de un circuito inductivo que tiene una inductancia de 3 henrio y una resistencia de 15 ohm?
12. Haga la diferenciación entre autoinductancia e inductancia mutua.
13. Defina la inductancia mutua referida a la unidad henrio.

14. Si el ritmo de cambio de corriente en la primera bobina (L_1) es de 6 ampere por segundo y la inductancia mutua es de 8 henrio ¿cuál es la magnitud de tensión inducida en la segunda bobina?

15. ¿De qué factores depende la inductancia mutua?

16. ¿Aumenta o disminuye la inductancia mutua de dos inductores en paralelo cuando son acercados uno hacia el otro?

17. Explique qué se quiere significar por coeficiente de acoplamiento.

18. ¿Cuál es el coeficiente de acoplamiento entre dos inductores de 1,5 henrio colocados en forma perpendicular?

19. Cuando está presente la inductancia mutua, los inductores............ conectados en serie producirán una inductancia total mayor que los inductores............ conectados en serie.

20. Si dos inductores se conectan en forma tal que están en serie, opuestos ¿cuál es la inductancia total de la combinación? ($L_1 = 10$ henrio, $L_2 = 6$ henrio, $M = 2$ henrio).

21. Si dos bobinas, una con 5 henrio y la otra con 2 henrio, se conectan en paralelo, complementándose mutuamente, y la inductancia mutua es de 2 henrio ¿cuál es la inductancia total del circuito?

22. Tres inductores en paralelo sin acoplamiento magnético, tienen valores de inductancias de 6, 3, y 6 henrio. Utilizando el método producto sobre suma, hállese la inductancia total del circuito. ¿Es este valor menor o mayor que cualquiera de los tres inductores?

23. Con los siguientes datos de una bobina de una sola capa, calcúlese la inductancia: 200 vueltas de alambre, 2 pulgadas de largo y 0,7 pulgadas de radio medio.

24. Calcular el número de vueltas de alambre Nº 30 cubierto por doble capa de seda, necesario para construir un inductor de capa única con una inductancia de 280 microhenrio, una longitud de dos pulgadas y un radio medio de 0,6 pulgada.

25. Calcule el valor de inductancia de un inductor de capas múltiples, con los siguientes datos: 200 vueltas de alambre, longitud de 1,5 pulgadas, un radio medio de 0,5 pulgada y una profundidad de la bobina de 0,3 pulgada.

26. Con los siguientes datos calcular la inductancia de una bobina espiral plana: 100 vueltas de alambre; profundidad de la bobina, 0,2 pulgada, y radio medio, 0,7 pulgada.

27. Dibujar un ejemplo de bobina con arrollamiento no-inductivo de pocas vueltas.

28. ¿Por qué en los equipos electrónicos se doblan, a veces, los filamentos o alambres calefactores?

29. Explicar lo que significa bobina de choque.

CAPITULO X

Capacitancia

10-1 Introducción

Todo circuito eléctrico tiene tres propiedades fundamentales: resistencia, inductancia y capacidad. Ya se han visto los efectos producidos por la resistencia y la inductancia. La parte componente que da origen a la capacidad se llama capacitor. La capacidad es la propiedad por la cual dos conductores separados por un elemento no conductor tienen la capacidad de almacenar una carga eléctrica y oponerse a cualquier cambio de la misma. La capacidad existe en los circuitos de corriente alternada y en los de continua; sin embargo, sólo se considerará en este capítulo el efecto de la capacidad en los circuitos de corriente continua.

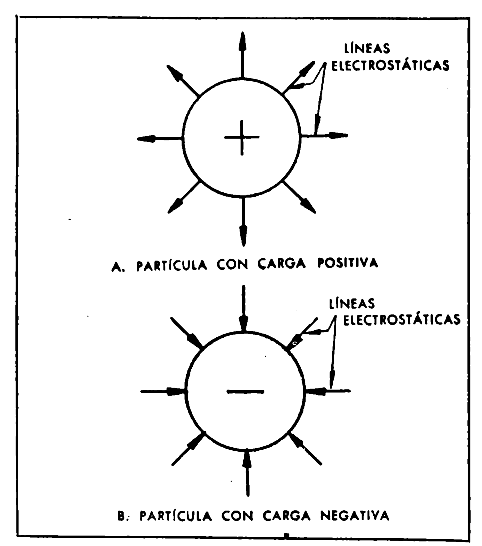


Figura 10-1. Sentido de las líneas de fuerza electrostáticas alrededor de partículas cargadas

10-2 REVISIÓN DE LOS PRINCIPIOS ELECTROSTÁTICOS

En los fundamentos de la física, sección 1-4, se encontró que existía un campo entre cuerpos con cargas. Si los cuerpos o partículas se cargaban con cargas del mismo signo, se repelían. En forma inversa, si tenían cargas distintas había una atracción entre las mismas. Estas fuerzas eran creadas por la existencia de líneas de fuerza electrostática entre los cuerpos cargados, irradiadas en todas direcciones desde una partícula cargada con signo positivo hacia una partícula negativa. En la figura 10-1 se ve el sentido de las líneas de fuerza alrededor de las cargas negativas y positivas.

Si a las dos partículas de la figura 10-1 se les diera forma de placas, y estuvieran montadas en forma paralela una al lado de otra, como en la fig. 10-2, las líneas electrostáticas tenderían a fluir de la parte de la placa Nº 1 con carga positiva, a la placa con carga negativa Nº 2. En la figura sólo se muestran las líneas que contribuyen al campo entre las dos placas.

Si pudieran aumentarse en magnitud las cargas de las placas 1 y 2, el número de líneas de fuerza electrostáticas entre las placas también aumentaría. Como una carga positiva es una deficiencia de electrones, y una carga negativa es un exceso de electrones, se deduce que se requiere un medio

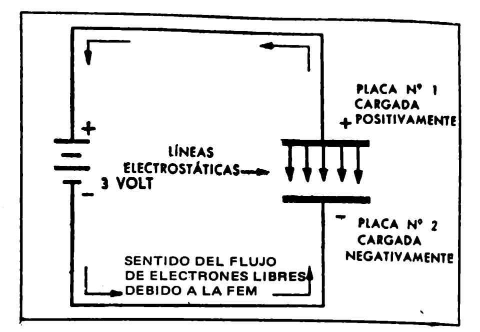


Figura 10-2. Método para aumentar la carga positiva en una placa

para mover los electrones y aumentar la carga en cualquiera de las placas. Si se conecta una batería a través de las placas, como en la fig. 10-2, los electrones de la placa 1 son atraídos al terminal positivo de la batería y los electrones de la batería son empujados hacia la placa 2.

Cuando se desconecta la batería del circuito, el exceso de los electrones libres en la placa 2 no tienen camino por donde volver a la placa 1 (véase la fig. 10-3). En este caso, los tres volt de f.e.m. de la batería han sido convertidos en energía electrostática y almacenados en forma de campo electrostático. Si se recuerda que se requiere una f.e.m. para mover los electrones, se puede probar que se ha almacenado una f.e.m. en el campo electrostático entre las dos placas. En la figura 10-4 se ha conectado un amperímetro muy sencillo como camino de retorno para el exceso de electrones en la placa 2. Este amperímetro se ha conectado entre las dos placas cargadas. Cuando se realiza la conexión, la fuerza del campo electrostático empuja el exceso de electrones de la placa negativa hacia la placa positiva. Como el número del exceso de electrones es pequeño, el amperímetro se desviará sólo por un instante, pero indicará que han pasado electrones por el mismo y retornado a la placa 1. Cuando los electrones llegan a la placa 1, ésta pierde su carga positiva y la placa 2 su carga negativa. Cuando la carga de las placas se ha perdido de esta manera, el campo de fuerza electrostática se ha descargado.

Por lo tratado sobre carga y descarga del campo magnético, se puede ver que dos conductores separados por un aislante son capaces de almacenar carga eléctrica. Asimismo, en la fig. 10-2 se puede notar que cuando las placas se cargan, la polaridad de la carga en las mismas se opone a la f.e.m. de

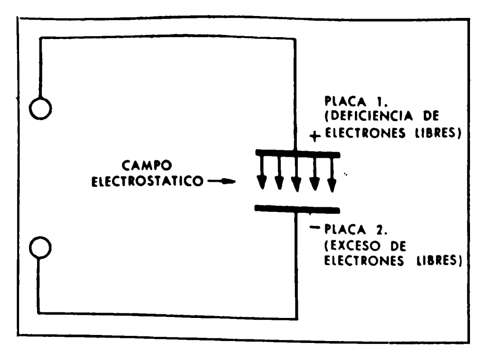


Figura 10-3. Campo electrostático remanente entre 2 placas cargadas

la batería. La corriente cesa cuando las placas se han cargado por completo. Este desarrollo y almacenamiento de una carga que se opone a la tensión aplicada, es un efecto de la capacidad. En los circuitos de corriente continua, donde la tensión es de polaridad constante, la capacidad detiene el flujo de corriente una vez que la f.e.m. debida a la carga se hace igual a la tensión provista. Sin embargo, en los circuitos de corriente alternada, la tensión cambia constantemente su polaridad y el efecto de capacidad es de naturaleza diferente, pues alternativamente almacena y descarga energía.

10-3 UNIDAD DE CAPACIDAD

La unidad de medida de capacidad es el faradio denominado así en honor de Michael Faraday. Se lo define como magnitud de capacidad que permite a un condensador obtener una carga de 1 coulomb

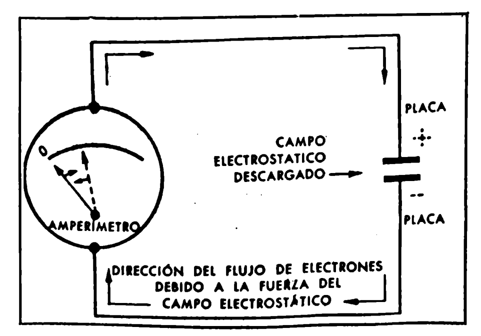


Figura 10-4. Amperímetro utilizado como camino por el cual vuelve el exceso de electrones libres de la placa 2 a la placa 1

cuando se le aplica un volt. Esta relación se puede expresar:

$$1 \text{ faradio} = \frac{1 \text{ coulomb}}{1 \text{ volt}}$$

Este valor de capacidad es demasiado grande para aplicaciones comunes de los circuitos; asimismo, el tamaño de un condensador de 1 farad sería demasiado grande o largo para el uso en los circuitos eléctricos comunes. Puesto que el farad es una magnitud tan grande, el valor de capacidad se establece en fracciones tales como microfarad o micromicrofarad. La tabla 10-1 muestra la relación entres las diversas unidades de capacidad.

TABLA 10-1. UNIDADES DE CAPACIDAD

1 faradio = 10^6 microfaradio
1 faradio = 10^{12} micro-microfaradio
1 microfaradio = 10^{-6} faradio
1 micro-microfaradio = 10^{-12} faradio

Los símbolos µ y µµ representan respectivamente los términos micro y micro-micro.

10-4 CAPACITORES

Un capacitor está construido fundamentalmente con dos placas paralelas, separadas por un material aislante llamado dieléctrico. Algunos de los materiales dieléctricos comunes son: aire, aceite, papel, cerámica y mica. Los nombres dados a los tipos de capacitores generalmente se refieren al tipo de material dieléctrico usado.

Tipos de capacitores y su construcción

Los condensadores se dividen en dos clases principales: el tipo fijo, designado para poseer sólo un valor de capacidad, y el tipo variable, cuya capacidad puede variarse dentro de un alcance prefijado.

En las fig. 2-10 a 2-12 pueden apreciarse diversos tipos de los cuales los más usados son los del tipo fijo, fabricados con papel, mica, cerámica y aceite como material dieléctrico. Los capacitores variables se emplean donde es necesario cambiar la capacidad del circuito, tal como el caso del sintonizador del receptor de radio. Los capacitores selectivos generalmente utilizan aire o mica como material dieléctrico.

Capacitores de papel

El capacitor fijo de papel usa papel encerado como dieléctrico y capas finas de metal como pla-

cas. El papel y las capas de metal se cortan en largas tiras, con 2 o 3 tiras de papel entre cada capa de metal. Se utilizan 2 o 3 tiras de papel para evitar que pequeños agujeros en el mismo inutilicen el dieléctrico; de dicha inutilización del dieléctrico se tratará ampliamente más adelante. Las capas de papel y metal así formadas se enrollan alrededor de un material no conductor, tal como bakelita, con los bordes del metal más largos que los del papel para efectuar una buena conexión de las placas. Esta construcción se muestra en la figura 10-5. En algunos casos se deja de usar el material no conductor central, es decir que se arrolla sin núcleo.

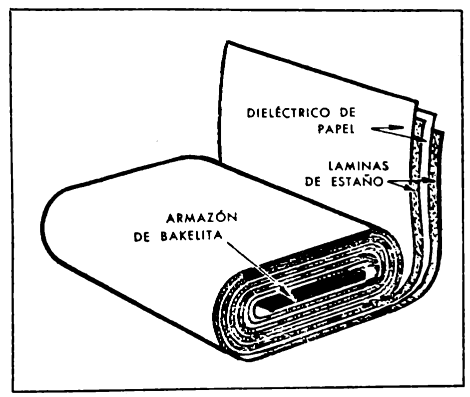


Figura 10-5. Ejemplo de construcción de un capacitor con dieléctrico de papel

Después que se ha arrollado el conjunto, se puede cubrir éste con una capa de cartón, una capa plástica, o insertarlo en una cajita de aluminio. Los bornes se conectan entonces a las distintas secciones del metal laminado; asimismo se taponan los extremos con parafina o aluminio, completando así la construcción. Este tipo de capacitor se usa comúnmente en circuitos donde no se excede una tensión máxima de 600 a 800 volt. El capacitor de papel se puede conectar en un circuito electrónico sin tener en cuenta las polaridades de la tensión aplicada; sin embargo, se lo marca por lo general con una banda negra en una punta, que indica el borne conectado a la tira exterior de las láminas de metal. Cuando se conectan capacitores con estas marcas en un circuito, la capa externa debe conectarse al punto de potencial mínimo o tierra. En consecuencia, la capa externa actuará como blindaje.

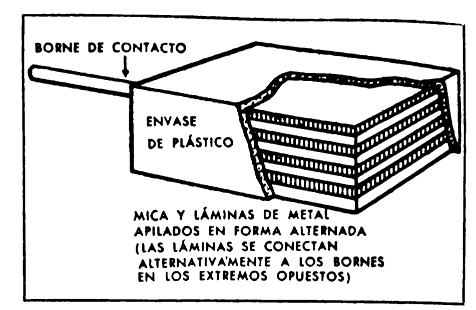


Figura 10-6. Vista de la construcción de un capacitor con dieléctrico de mica

Capacitores de mica

Los capacitores de mica son generalmente pequeños, de forma rectangular y están encerrados en mica o bakelita. Utilizan capas delgadas de mica como dieléctrico y capas finas de metal como placas. Estas capas se disponen en forma alternada y luego se prensan fuertemente. Las planchas no se pueden arrollar pues la mica no es flexible. Los condensadores se moldean en cajas de plástico o bakelita. En la fig. 10-6 se puede apreciar una sección de un capacitor de este tipo. Se ha comprobado que la mica es mejor dieléctrico o material aislante que el papel y, en consecuencia, los fabricados con mica se pueden utilizar en circuitos con tensión máxima de cerca de 7.500 volt.

Capacitores de aceite

Los capacitores con dieléctrico de aceite se dividen en dos clases. El primer tipo sirve para tensiones entre 600 y 2000 volt, y puede soportar una corriente grande. Este es del tipo de papel impregnado, en el cual el dieléctrico es de papel saturado con aceite. El aceite sirve para aumentar las propiedades dieléctricas del papel, y ayuda al enfriamiento del mismo cuando está trabajando. Se utiliza un aceite especial no conductor Este tipo de capacitor puede confundirse fácilmente con el de tipo de papel, encerrado en aluminio, que es físicamente parecido. Sin embargo, generalmente se marcan para evitar confusión.

El segundo tipo de capacitor de aceite no usa papel impregnado, sino que utiliza exclusivamente aceite líquido como dieléctrico. Este tipo es de mayor tamaño y generalmente se utiliza en estaciones de elevada potencia eléctrica. En los equi-

pos de radar también se encuentran estos tipos de capacitores, pero de tamaño más chico. Asimismo, este tipo de capacitor puede contener un dieléctrico suplementario de vidrio, insertado en el mismo. Estos capacitores son capaces de soportar una corriente elevada, con tensiones entre los 15.000 y 20.000 volt. Comparados con su tamaño se ve que tienen un valor pequeño de capacidad.

Capacitores de cerámica

El capacitor de este tipo es de tamaño muy pequeño, comparado con la alta tensión (de hasta) 30.000 volt) que puede soportar. Se utiliza donde la frecuencia, o variación de corriente alternada, es muy alta y, generalmente, se lo encuentra en aparatos de televisión y en equipos de comunicaciones de alta frecuencia. Este tipo posee un bajo valor de capacidad debido a su tamaño pequeño. Generalmente consiste en un tubo de cerámica hueco recubierto en su interior y exterior con una capa de plata. La cerámica es un material altamente dieléctrico. La capa de plata dentro del cilindro de cerámica actúa como una de las placas, y la capa externa, como la otra. Después que los bornes se han conectado al interior y exterior de las placas, el condensador se baña con un esmalte vítreo. Este material aislante sirve para aislar la capa externa de plata y su posible alta tensión del resto del equipo.

Capacitores electrolíticos

Se clasifican en dos tipos: húmedo y seco. La forma en la cual se utiliza el electrólito determina el tipo. Si el electrólito está en solución será condensador electrolítico húmedo; si el electrólito es una pasta o gelatina, es un condensador electrolítico seco. El tipo húmedo tiene la desventaja de tener que ser montado verticalmente para evitar el derrame del líquido contenido, y en consecuencia ya no se utiliza. El tipo seco, que puede ser montado en cualquier posición, se emplea donde se necesita un capacitor de bajo costo y de alta capacidad. La acción química que forma el dieléctrico en el capacitor electrolítico es fundamentalmente la misma para los dos tipos. Este proceso de formación de dieléctrico se puede explicar más fácilmente para el tipo húmedo; en consecuencia, se explicará a continuación en detalle, y luego se tratará el tipo seco. En el estudio de las baterías se vio que la principal desventaja de las mismas era la polarización del terminal positivo; es decir, que se forman pequeñas burbujas de hidrógeno en el electrodo positivo, de tal manera que cortan la corriente interna de la

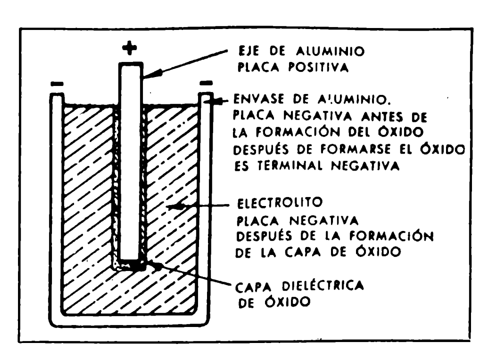


Figura 10-7. Construcción de un capacitor electrolítico

batería, aislando el terminal positivo del electrólito. Puesto que las burbujas de hidrógeno actúan como aislante entre dos conductores, una pila en estas condiciones se puede considerar como un condensador. Una reacción similar a ésta es la base de los capacitores que poseen grandes valores de capacidad.

El capacitor electrolítico se construye con un envase de aluminio, un eje del mismo material suspendido en el medio pero sin tocar los bordes, y una solución de tetraborato de sodio (una forma de bórax), vertida alrededor del eje central.

El conjunto se conecta entonces a una fuente de tensión de corriente continua y la corriente fluye a través del capacitor desde el envase que está conectado al terminal negativo de la batería. Este flujo de corriente hace que el eje de aluminio se cubra de una fina capa de óxido (véase la fig. 10-7), o sea un material aislante derivado del bórax. Esta capa, que en efecto ha sido electroplateada hasta cubrir por completo el eje central, actúa ahora como dieléctrico y separa la placa positiva del electrólito, que se convierte en la placa negativa después de formar la capa de óxido. El envase de aluminio sirve como terminal de la placa electrolítica externa.

Al utilizar un capacitor electrolítico, debe tenerse cuidado de respetar las indicaciones para conexión de los extremos positivo del eje central, y del envase externo negativo. Si se conectaran en forma inversa en un circuito, se destruirá el capacitor porque desaparece el óxido del eje central. Asimismo, cuando se conecta invertido, la corriente actuará como la corriente cobre-a-óxido que se ha visto previamente en el rectificador cobre-óxido. Esta alta corriente provocará la generación de calor y gas en el envase de aluminio,

casi totalmente hermético, y en muchos casos puede explotar. Es muy importante observar las polaridades marcadas.

Puesto que la tensión de ruptura (perforación del dieléctrico) para la delgada capa de óxido es bastante baja (del orden de 600 a 800 volt), el uso del capacitor de electrólito húmedo se limita a equipos pequeños, como ser receptores de radio. El límite de tensión de ruptura del capacitor se establece en base al valor de tensión requerido para crear o formar la capa de óxido.

Puesto que la principal ventaja de los capacitores electrolíiticos es la amplitud del valor de su capacidad con respecto a su tamaño pequeño, se ha procurado aumentar aún más la capacidad aumentando el tamaño del eje central. Por esta razón, la placa positiva, por lo general, está hecha de una bobina de fino aluminio que, en realidad, aumenta la superficie de la placa positiva. Más adelante se verá la forma en que varios factores físicos afectan la capacidad del capacitor.

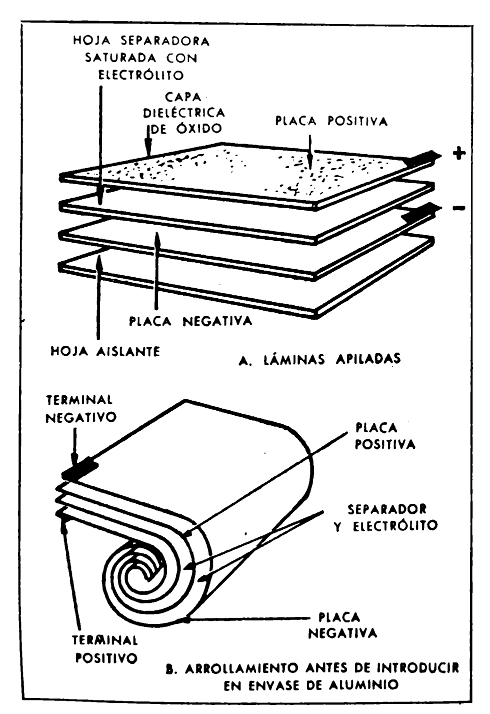


Figura 10-8. Detalles de la construcción del capacitor electrolítico

En la figura 10-8 se detalla la construcción del capacitor electrolítico seco. En el mismo, la placa positiva y el terminal negativo son planchas de aluminio separadas por un electrólito gelatinoso impregnado en hojas de papel o gasa. La placa positiva se cubre con el fino dieléctrico de óxido que le da un color gris apagado. El electrólito de gelatina es la placa negativa. tal como se ha visto para el tipo húmedo. Se puede cortas las placas positivas o negativas en secciones para formar un capacitor múltiple, conectando los terminales separados a cada sección. Este método forma varios capacitores en uno solo. Estas pilas de aluminio y gelatina se arrollan y colocan en un cartón duro, o también en un envase de aluminio similar al de los capacitores de papel. Puesto que el electrólito no es líquido, no se puede derramar. En consecuencia, se puede montar el capacitor en cualquier posición.

Capacitores variables

Se los llama así porque su capacidad puede variarse, en un alcance bastante amplio, mediante el aumento o disminución de la superficie de las dos placas, como se muestra en la fig. 10-9. Una placa es móvil y la otra es fija. Cuando se gira el eje en el sentido de las agujas del reloj, a partir de la posición mostrada, se alinean las dos placas, aumentando el área enfrentada entre las mismas. Esto aumenta la capacidad, puesto que se puede almacenar sobre las mismas una cantidad mayor de electrones. Cuando se gira el eje a la inversa, a partir de la posición mostrada, se alejan las placas y disminuye la capacidad. Esta acción de disminución y aumento de la superficie enfrentada de las placas de un capacitor, para variar su capacidad, se vio en detalle en la sección 10-6,

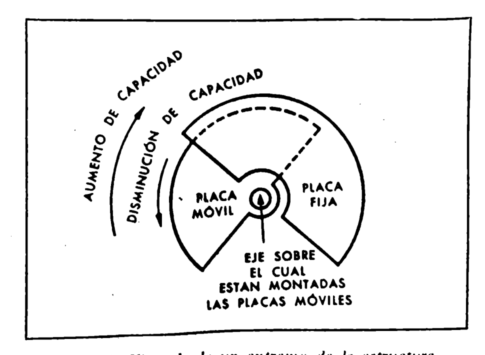


Figura 10-9. Vista desde un extremo de la estructura fundamental de un capacitor variable.

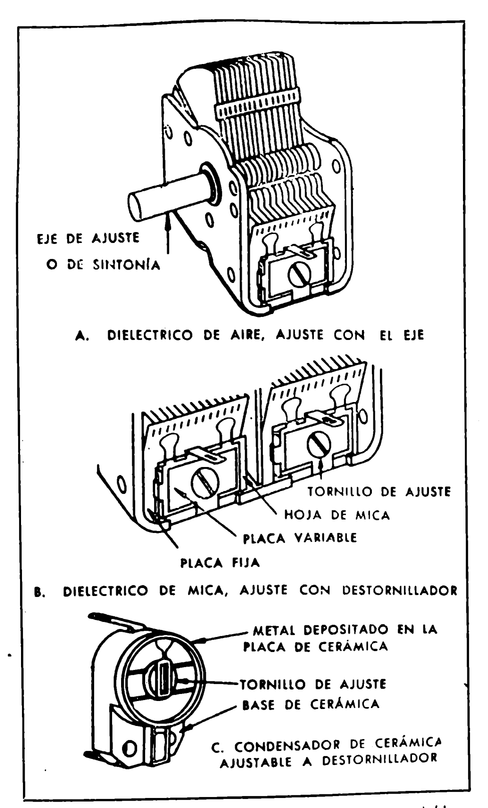


Figura 10-10. Diversos tipos de capacitores variables

bajo el título "Factores físicos que afectan la capacidad".

Se muestra en la figura 10-10 la construcción de 3 capacitores variables. La parte a) muestra el tipo variable con dieléctrico de aire, el cual se construye en muchos tamaños y se encuentra en transmisores y receptores de radio. La parte b), el capacitor variable con dieléctrico de mica, ajustable con destornillador, y que se usa también en los receptores de radio. Se lo emplea para balancear los circuitos y se lo denomina "trimmer o padder". La capacidad se regula al girar el tornillo, con lo cual varía la distancia entre las placas. El tercer capacitor ajustable (parte c), es el de tipo de cerámica. Este capacitor varía girando el tornillo mostrado en la figura y cambia así la superficie paralela de las placas.

10-5 SISTEMAS DE MARCADO DE CAPACITORES

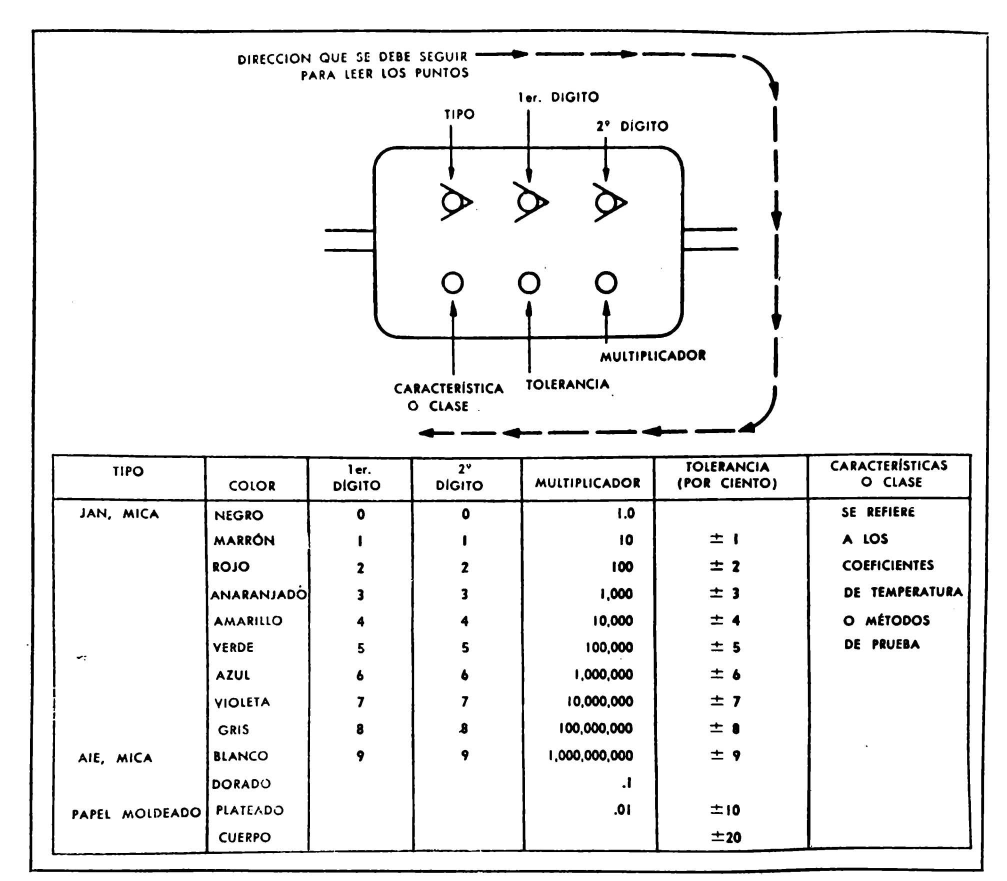
Los distintos tipos de capacitores están codificados de manera similar al código de colores de las resistencias. Hay dos sistemas de colores para capacitores. Uno es el de JAN o sea el Junta Ejército y Marina (EE. UU.), sistema por el cual se marcan todos los capacitores para uso militar. El otro es el RMA (o sea Asociación Fabricantes de Radio, EE. UU.), sistema que ha cambiado sucesivamente al RETMA, y luego al EIA (Electronics Industries Association, de EE. UU.). Es este último el sistema que está actualmente en uso. Se tratará a continuación la forma en que se emplean los sistemas EIA y JAN, para la codificación de los diversos tipos de capacitores. En el caso de que un capacitor no tenga marcas del código de color, su valor estará impreso directamente.

El sistema de marcado de 6 puntos

La comparación entre los dos sistemas de código de colores se hará con el tipo de capacitor moldeado de mica. En la figura 10-11, y en la tabla de valores del color, se pueden apreciar los sistemas JAN y EIA de 6 puntos para el marcado de capacitores moldeados de mica y papel.

En dicha figura se indica la forma de leer el código de 6 puntos. La dirección en que debe leerse, generalmente se indica sobre el mismo capacitor, por una línea punteada alrededor de los 3 puntos del código de color en la fila superior. El punto incial indica con su color el tipo de capacitor. Si fuera negro, se trataría entonces de un capacitor de mica código de colores JAN, según puede comprobarse en la tabla. Si el primer punto fuera blanco, sería un capacitor moldeado de mica del sistema EIA. El color plateado del primer punto indica un capacitor moldeado de dieléctrico de papel. Ambos sistemas tienen la misma ubicación para los seis puntos; la única diferencia es el color del punto inicial para indicar un capacitor moldeado de mica. Se representan los colores de estos dos sistemas con los números, tolerancias y multiplicadores que corresponden. Todos los códigos de colores expresan el valor de la capacidad en micro-microfaradio. Por ejemplo, si los colores de la fila superior de 3 puntos fueran: negro, amarillo y violeta, de izquiera a derecha, y el punto multiplicador fuera anaranjado, el valor del condensador en micro-microfaradio se obtendría así:

1. El color negro del punto inicial señala un capacitor moldeado JAN.
2. El primer y segundo dígito de colores ama-



TIPO	COLOR	1er. DÍGITO	2º DÍGITO	MULTIPLICADOR	TOLERANCIA (POR CIENTO)	CARACTERÍSTICAS O CLASE
JAN, MICA	NEGRO	0	0	1.0		SE REFIERE
	MARRÓN	1	1	10	± 1	A LOS
	ROJO	2	2	100	± 2	COEFICIENTES
	ANARANJADO	3	3	1,000	± 3	DE TEMPERATURA
	AMARILLO	4	4	10,000	± 4	O MÉTODOS
	VERDE	5	5	100,000	± 5	DE PRUEBA
	AZUL	6	6	1,000,000	± 6	
	VIOLETA	7	7	10,000,000	± 7	
	GRIS	8	8	100,000,000	± 8	
AIE, MICA	BLANCO	9	9	1,000,000,000	± 9	
	DORADO			.1		
PAPEL MOLDEADO	PLATEADO			.01	±10	
	CUERPO				±20	

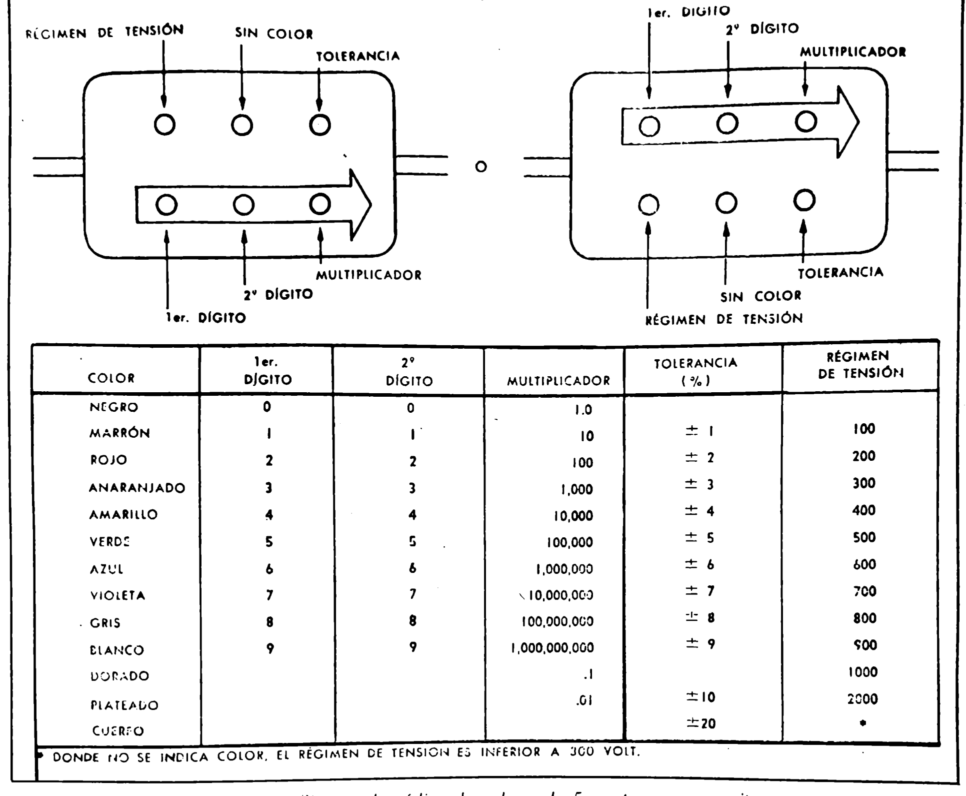
Figura 10-11. Sistema de código de colores para capacitores de mica y de papel moldeado AIE (asociación-industrias-electrónicas) y JAN (junta-ejército-marina; U. S. A.)

rillo y violeta dan un número de dos dígitos, 47.

3. El multiplicador de color anaranjado significa que deben agregarse tres ceros al númemero de dos dígitos (es decir, este número se multiplica por 1000), para hallar la capacidad en micro-microfaradio. Para reducir este valor a términos matemáticos más simples, se pueden convertir los 47.000 micro-microfaradio en 0,047 microfaradio.

Los dos puntos que falta considerar en este sistema, corresponden a la tolerancia y a la característica. El punto de tolerancia puede ser cualquier color que representa cualquier valor de porcentaje desde 1 % para marrón a 10 % para plata y 20 % si el punto es del mismo color que el cuerpo del capacitor. En consecuencia, un capacitor de 0,047 microfaradio con una tolerancia color plata, sería igual a 0,047 microfaradio más o menos un 10 %. Es decir que los valores máximos y mínimos entre los cuales estará el valor de capacidad serán 0.0517 y 0.0423 microfaradio, respectivamente. Estos valores se hallaron como sigue:

+ 10 por ciento	— 10 por ciento
0,0470 microfaradio	0,0470 microfaradio
+ 0,0047	— 0,0047
0,0517 microfaradio	0,0423 microfaradio



COLOR	1er. DÍGITO	2º DÍGITO	MULTIPLICADOR	TOLERANCIA (%)	RÉGIMEN DE TENSIÓN
NEGRO	0	0	1.0		
MARRÓN	1	1	10	± 1	100
ROJO	2	2	100	± 2	200
ANARANJADO	3	3	1,000	± 3	300
AMARILLO	4	4	10,000	± 4	400
VERDE	5	5	100,000	± 5	500
AZUL	6	6	1,000,000	± 6	600
VIOLETA	7	7	10,000,000	± 7	700
GRIS	8	8	100,000,000	± 8	800
BLANCO	9	9	1,000,000,000	± 9	900
DORADO			.1		1000
PLATEADO			.01	±10	2000
CUERPO				±20	*

* DONDE NO SE INDICA COLOR, EL RÉGIMEN DE TENSIÓN ES INFERIOR A 500 VOLT.

Figura 10-12. Sistema de código de colores de 5 puntos para capacitores.

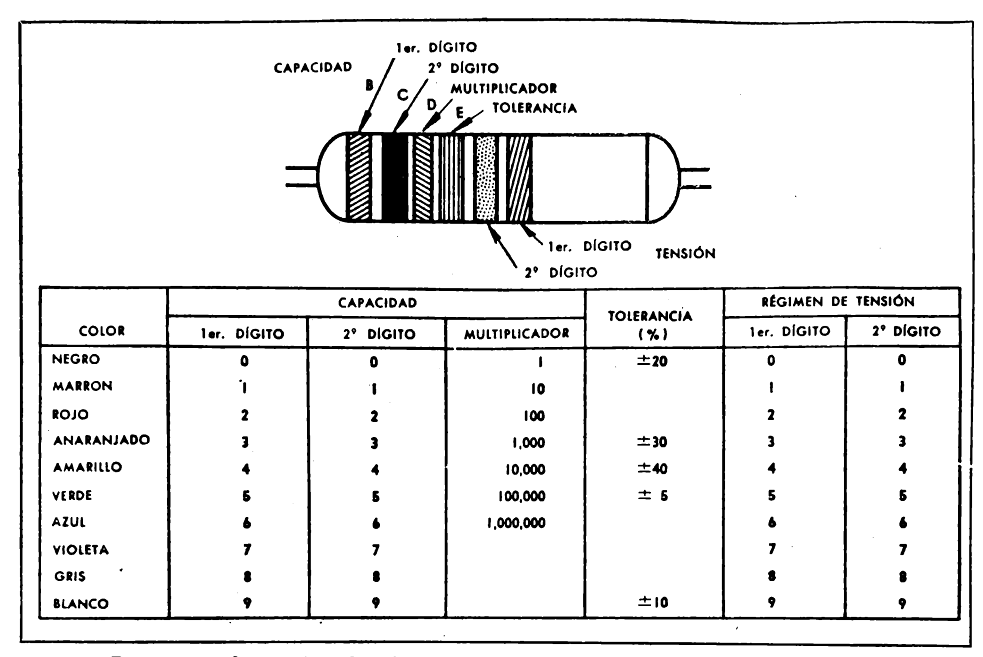
El punto final, el sexto, rara vez se emplea, e indica entre las características correspondientes al capacitor, el coeficiente de temperatura o métodos de ensayo.

Sistema de marcado de 5 puntos

Este sistema de marcas para capacitores de dieléctrico de papel y mica se muestra en la figura 10-12, junto con una tabla de valores de color, tolerancias y alcances de tensión. En la figura se aprecía que existen dos métodos para obtener la capacidad en el código de colores de 5 puntos. En uno, se lee la línea inferior de izquierda a derecha a lo largo de la flecha estampada en el plástico. En el segundo, se lee la línea superior de izquierda a derecha por una flecha similar a la anterior. El sistema de 5 puntos se lee comenzando con el primer dígito del valor de capacidad. La manera de leer un capacitor marcado con los colores azul, gris, rojo en los dos primeros dígitos y el multiplicador, es la siguiente:

1er. Dígito	2do. Dígito		multiplicador		micro-microfaradio
6	8	×	100	=	6800 $\mu\mu$F

Los dos puntos finales, la tolerancia y el alcance de tensión, se leen siempre en dirección inversa a la lectura de los primeros tres, o sea de derecha a izquierda. A la derecha de la última línea de puntos está el color de la tolerancia. Es decir, si el condensador precedente de 6800 micro-microfa-



COLOR	CAPACIDAD			TOLERANCIA (%)	RÉGIMEN DE TENSIÓN	
	1er. DÍGITO	2° DÍGITO	MULTIPLICADOR		1er. DÍGITO	2° DÍGITO
NEGRO	0	0	1	±20	0	0
MARRON	1	1	10		1	1
ROJO	2	2	100		2	2
ANARANJADO	3	3	1,000	±30	3	3
AMARILLO	4	4	10,000	±40	4	4
VERDE	5	5	100,000	± 5	5	5
AZUL	6	6	1,000,000		6	6
VIOLETA	7	7			7	7
GRIS	8	8			8	8
BLANCO	9	9		±10	9	9

Figura 10-13. Sistema de código de colores para capacitores tubulares de dieléctrico de papel

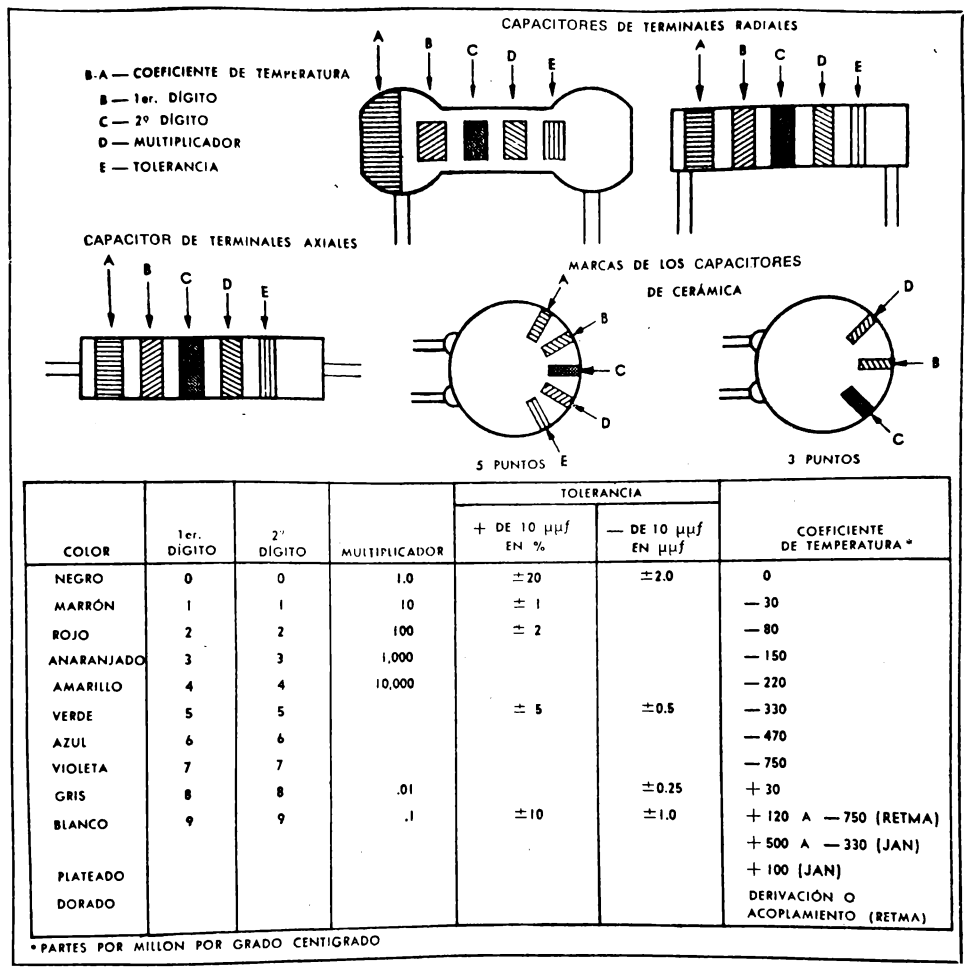
radio tenía un punto de tolerancia verde, su valor real estará entre un 5% en más o menos de aquél indicado. Los valores máximos y mínimos serían 6834 y 6766 micro-microfaradio, respectivamente.

El último punto del sistema de 5 puntos indica el alcance de tensión. Los colores de este punto se tienen en la columna de alcances de tensión de la tabla. Los valores de estos colores representan tensiones de 100 a 2000 volt. Si este punto no está coloreado, se presume que la tensión máxima que se debe aplicar al condensador es de 300 volt. Los alcances indicados por estos colores no deben ser excedidos; por ejemplo, un condènsador con un punto rojo no debe ser insertado en un circuito en el cual pueda existir una tensión de corriente continua mayor de 200 volt.

Sistema de código de bandas de colores para capacitores tubulares de papel

Este sistema utiliza seis bandas de color para marcar la capacidad, el porcentaje de seguridad (tolerancia) y el alcance de tensión. La figura 10-13 da un ejemplo de este sistema para marcar, y también una tabla de los valores de colores. Esta figura muestra que las bandas que indican el valor de la capacidad, son las primera cuatro y comienzan en un extremo del capacitor. El capacitor debe ubicarse de tal forma que las bandas puedan leerse de izquierda a derecha, como se muestra en la figura. La diferencia principal entre este sistema y otros, es que se usan dos dígitos o franjas para indicar el alcance de tensión. El alcance de tensión de un capacitor se encuentra tomando los valores codificados indicados y multiplicándolos por una constante igual a 100. Como ejemplo, si un capacitor de papel tiene bandas roja, violeta, anaranjada, negra, marrón y negra, sus características serían 27000 micro-microfaradio, más o menos el 20 % con una tensión de 1000 volt. Si la tensión normal del capacitor es menor que 1000 volt, la segunda banda de tensión puede ser omitida.

Los capacitores de papel se fabrican de muchos valores, pero los más usados son los que varían entre 8 microfaradio y 0,0005 microfaradio (8 μF a 500 $\mu\mu$F).



COLOR	1er. DÍGITO	2º DÍGITO	MULTIPLICADOR	TOLERANCIA + DE 10 µµf EN %	TOLERANCIA — DE 10 µµf EN µµf	COEFICIENTE DE TEMPERATURA *
NEGRO	0	0	1.0	±20	±2.0	0
MARRÓN	1	1	10	± 1		—30
ROJO	2	2	100	± 2		—80
ANARANJADO	3	3	1,000			—150
AMARILLO	4	4	10,000			—220
VERDE	5	5		± 5	±0.5	—330
AZUL	6	6				—470
VIOLETA	7	7				—750
GRIS	8	8	.01		±0.25	+30
BLANCO	9	9	.1	±10	±1.0	+120 A —750 (RETMA)
						+500 A —330 (JAN)
PLATEADO						+100 (JAN)
DORADO						DERIVACIÓN O ACOPLAMIENTO (RETMA)

* PARTES POR MILLON POR GRADO CENTIGRADO

Figura 10-14. Sistema de código de colores para capacitores de cerámica.

Sistema de código de colorés para capacitores de cerámica

Este tipo de capacitor generalmente se marca con el código de 5 puntos o franjas. El orden para localizar y leer estos puntos, asi como la tabla de valores, se muestra en la figura 10-14. Los 5 puntos representan el coeficiente de temperatura del capacitor, el primer y segundo dígitos del valor de la capacidad, el valor multiplicador de la misma, y la tolerancia del capacitor. Puesto que los capacitores de cerámica están sujetos frecuentemente a calentamientos en sus aplicaciones en los circuitos, su coeficiente de temperatura está incluído en el código. En algunos capacitores cerámicos, un incremento de temperatura se traduce en un incremento de capacidad; esto

se denomina coeficiente positivo de temperatura. En la mayoría de los casos un aumento en la temperatura resulta en una disminución de la capacidad; esto se denomina coeficiente de temperatura negativo. Los colores que se muestran en la tabla de la figura 10-14 pueden utilizarse para representar los coeficientes de temperatura de 0 a menos 750, y más 30 a más 500. Los números representan el cambio de capacidad en partes por millón por grado centígrado. Por ejemplo, si la banda del coeficiente de temperatura es roja, cuando se caliente el condensador, perderá 80 millonésimas (menos 80) de su capacidad total por cada grado centígrado de cambio de temperatura. Si la banda de temperatura es gris, el capacitor aumentará en su capacidad total 30 millonésimos (más 30) por cada grado centígrado de aumento de temperatura. Si se aumentara a 100°C la temperatura de un capacitor de cerámica de 30 micro-microfaradio con un coeficiente positivo de 30 grados, la capacidad aumentaría a 30,09 $\mu\mu$F.

grados × coeficiente = aumento de capacidad

100 × 30 = 3000 millonésimos de 30 micro-faradio ó

$$\frac{3000}{1.000.000} = 0{,}003 \text{ veces la capacidad total}$$

o sea

30 × 0,003 = 0,09 micro-microfaradio

Este aumento es casi un décimo de un micro-microfaradio. Pueden utilizarse aumentos de esta naturaleza con un propósito útil, como ser en un circuito compensador de temperatura. Sin embargo, como el más común es el coeficiente de temperatura negativo, es el que se utiliza en este tipo de circuito.

Se debe notar que la tabla de la figura 10-14 tiene dos listas de tolerancia, una para valores de capacidad menores de 10 micro-microfaradio y el otro para valores mayores que éste. Como ejemplo del uso de esta lista doble, considérese lo siguiente: el color negro de la banda de tolerancia de un capacitor de cerámica de capacidad mayor que 10 micro-microfadio representa una tolerancia en más o menos un 20 % de la capacidad total. El color negro de la banda de tolerancia que tiene menos que 10 micro-microfaradio de capacidad representa una tolerancia en más o menos 2 micro-microfaradio.

Para practicar en el reconocimiento de los valores de los capacitores de cerámica, supóngase un capacitor con bandas amarilla, roja, violeta, marrón y verde. Este capacitor es de 270 micro-microfaradio teniendo una tolerancia de más o menos un 5 % , y un coeficiente de temperatura de menos 220 millonésimas de su capacidad total, para cada grado centígrado de aumento de temperatura.

Los sistemas de marca 5 y 3 puntos para condensadores de cerámica, que se muestran en la figura 10-14, resultan antiguos actualmente aunque todavía se usan. En el código de tres puntos, el capacitor puede tener varios valores de tolerancia, tales como 2 micro-microfaradio, más o menos un 10 % , o mas o menos un 20 % . La tolerancia generalmente varía con el valor de capacidad y puede ser de cualquier valor. Se ha desarrollado un sistema para imprimir los valores de capacidad en el material aislante del disco capacitor. Muy a menudo se agregan las letras VMG (valor mínimo garantizado) y GMV (en inglés) antes del valor estampado. Un capacitor de cerámica con un valor mínimo garantizado de 10 micro-microfaradio posee muy posiblemente un valor tan alto como 12 ó 15 micro-microfaradio.

Marcado de capacitores electrolíticos

El tipo de tamaño pequeño de electrólito seco, generalmente envuelto en cartón, tendrá las marcas de capacidad y tensión estampadas en la tapa del envase. El tipo de capacitor más grande de electrólito seco, generalmente envuelto en aluminio, tendrá su capacidad y tensión estampadas sobre el aluminio, y pueden contener uno o más capacitores en un envase. Los valores de los distintos capacitores contenidos en el mismo envase se indican en cada borne con colores, de acuerdo con el código estampado en el envase. Por ejemplo, el código puede decir:

20 μF a 400 volt CC — Rojo
20 μF a 400 volt CC — Amarillo
10 μF a 300 volt CC — Verde
50 μF a 25 volt CC — Azul
Borne común negativo — Negro

Otras veces en estos capacitores múltiples se hace una marca cerca de los terminales cortos rígidos en el fondo o parte de abajo del envase. Esta marca puede tomar la forma de un triángulo, un cuadrado o un semicírculo, y el código se estampa al costado del envase de aluminio. Por ejemplo:

8 μF a 450 volt △
8 μF a 450 volt ⌓
25 μF a 25 volt □
25 μF a 25 volt ⌓

Marcado de los capacitores variables

La capacidad de los capacitores variables no se marca por lo general en el capacitor mismo. El alcance del capacitor de este tipo se estampa generalmente en el estuche o caja de venta.

10-6 TEORIA DEL FUNCIONAMIENTO DEL CAPACITOR

Se estableció anteriormente en este capítulo que el funcionamiento de un capacitor depende del campo electrostático que se ha formado entre dos placas con cargas opuestas. Este campo electrostático tiene un efecto sobre el material aislante entre las placas, que puede ser explicado considerando la estructura atómica del dieléctrico. La acción del dieléctrico puede explicarse simplemente, comparándola con el movimiento de un resorte bajo presión.

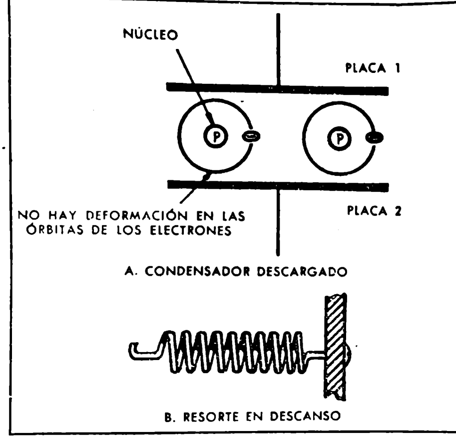


Figura 10-15. Comparación entre el dieléctrico de un capacitor cargado y un resorte en posición de descanso.

Acción del dieléctrico

En la figura 10-15 se muestran las placas de un capacitor descargado. Entre las placas del capacitor hay dos átomos simples de hidrógeno, que servirán para representar los átomos más complejos del material dieléctrico. Los electrones orbitales de estos átomos están representados moviéndose alrededor del núcleo de los mismos en círculos casi perfectos. En la parte B de la figura hay una bobina resorte en posición de descanso sin estar estirada ni comprimida. Cuando se aplica una fuerza electromotriz al capacitor, como en la figura 10-16, se cargará el potencial de la batería por efecto de la corriente que fluye de la placa 1 a la placa 2. Recuérdese la ley que establece que "cargas de mismo signo se repelen y cargas de distinto signo se atraen". Se puede apreciar que la carga negativa de la placa 2 repele los

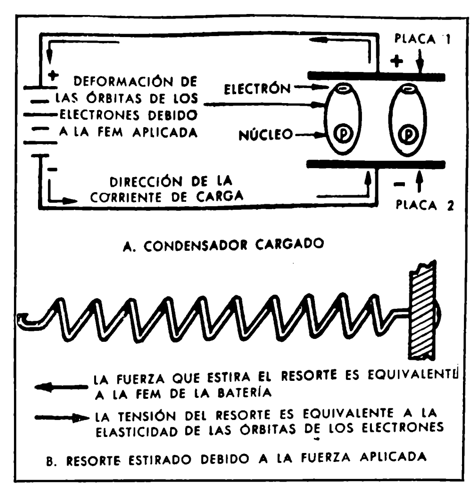


Figura 10-16. Comparación entre el dieléctrico de un capacitor cargado y un resorte en tensión

electrones orbitales y atrae el núcleo positivo del dieléctrico. Er forma similar, las cargas positivas de la placa 1 atraerán los electrones orbitales y repelerán el núcleo. En consecuencia, los centros de las órbitas de los electrones se moverán lejos de los núcleos, como se muestra en la figura. Asimismo las órbitas tomarán una forma elíptica u oval. De una manera muy similar, se ha tirado por medio de una fuerza del resorte (parte B de la figura) y se lo ha estirado. La fuerza que estiró el resorte puede compararse a la fuerza electromotriz de la batería que descolocó las órbitas de los electrones del dieléctrico. Cuando se estira un resorte, el mismo ejerce una fuerza contraria a esa fuerza que lo estira, tratando de situarse en su posición original. Esta fuerza contraria es similar a las fuerzas de las órbitas elásticas de los electrones en el material dieléctrico.

Cuando la fuerza que se ha aplicado al resorte es equilibrada por la tensión opuesta por el mismo, éste no se estirará más. De manera similar, cuando la f.em. aplicada al condensador es igualada por la tensión de las órbitas de los electrones, las mismas no se desplazarán más. Puesto que un mayor flujo de corriente tendría que desplazar aún más las órbitas, lo que haría que su tensión fuera mayor que la f.e.m., condición imposible, el capacitor bloquea el flujo continuado de la corriente continua.

En la figura 10-17 se ha soltado el resorte. Cuando esto ocurre, el resorte reacciona con una fuerza

igual a la fuerza que lo ha estirado. Por ejemplo, si el resorte ha sido estirado con una fuerza de 10 libras, cuando se suelta, reacciona también con una fuerza de 10 libras, sin tener en cuenta las pérdidas mecánicas. En consecuencia, cuando se estira el resorte se puede decir que ha sido "cargado a 10 libras", puesto que su resistencia interna es igual y opuesta a aquélla que lo estiró. De esta manera el resorte, estando estirado, se opuso a un cambio en la fuerza aplicada.

De manera muy similar, los electrones orbitales en el dieléctrico del condensador de la fig. 10-17, también tendrán un efecto de resorte para volver a sus órbitas originales, cuando se provee un paso para el exceso de electrones de la placa 2 a la placa 1. La tensión o fuerza de las órbitas desplazadas aumentó durante la carga, hasta que llegó a ser igual y opuesta a la fuerza que las desplazaba. Si la batería tiene una f.e.m. de tres volt, se dice que el capacitor ha sido cargado a 3 volt. Cuando se ha provisto un camino entre la placa 1 y la placa 2, el exceso de electrones en la placa 2 será dirigido a la placa 1 con una fuerza de 3 volt. En consecuencia, el capacitor por la carga y descarga posee capacidad, es decir, energía, para oponerse a un cambio de tensión.

Otro tema a ser considerado es la potencia o f.e.m. que puede soportar un capacitor sin dañarse. Si, por ejemplo, se ha utilizado una fuerza demasiado potente para estirar el resorte, puede ocurrir que, o se estire demasiado, y luego no vuelva a su posición original, o se rompa. De manera similar, si se aplica una f.e.m. demasiado grande, al capacitor, las órbitas de los electrones serán desplazadas tan lejos que se mantendrán alejadas de su núcleo. Cuando ocurre esto, los electrones orbitales serán forzados a convertirse en electrones libres, y la corriente fluirá por el material aislante del dieléctrico. Este fenómeno se denomina "*perforación del dieléctrico*".

Cuando se produce arco en un capacitor que utiliza aire como dieléctrico, se puede ver una chispa entre las placas. Esta chispa se compone de electrones que fluyen por el aire de la placa negativa a la positiva, y es algo parecida en su acción a la bujía de automóvil. Cuando este arco ocurre en un capacitor de dieléctrico de aire, es de poca importancia, pero si ocurre en uno de dieléctrico de mica, éste queda destruído. Cuando la avería se produce en la mica, las propiedades aislantes de la mica se destruyen debido a que se ha aplicado suficiente f.e.m. para que el aislante se transforme en conductor. Una vez que se ha forzado a un aislante a conducir electricidad, por efecto de haberse soltado electrones de sus órbitas, ya no tendrá las propiedades aislantes anteriores. Se observa que cuando el espesor de la mica del dieléctrico se reemplaza por un espesor igual de aire entre las placas, es necesaria una menor tensión para el salto de chispa, que en el caso de la mica. En consecuencia, un capacitor con dieléctrico de mica puede cargarse a un valor mayor de f.e.m. que el mismo capacitor con un dieléctrico de aire del mismo espesor. Esto quiere decir que la mica es un dieléctrico más potente que el aire y tiene mayor *potencia dieléctrica*.

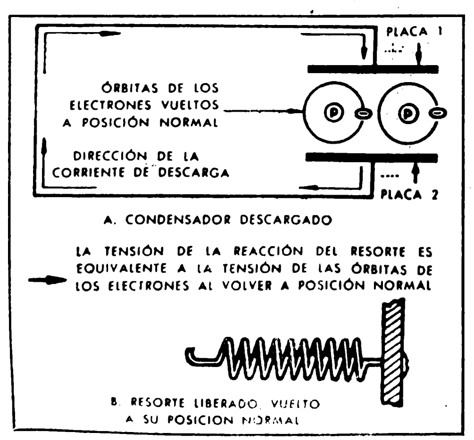


Figura 10-17. Comparación entre el dieléctrico de un capacitor descargado y un resorte liberado.

Propiedades dieléctricas

La tensión dieléctrica es una de las propiedades dieléctricas más importantes a estudiarse. Se define como la capacidad de un dieléctrico de soportar una f.e.m. sin averiarse. Todos los materiales no conductores (aislantes) tienen una alta resistencia específica, de tal manera que sólo una pequeña cantidad de corriente fluye por los mismos cuando se ha aplicado una tensión. Sin embargo, la tensión dieléctrica es una propiedad distinta. Si se inserta entre las placas de un capacitor un material aislante y se aumenta constantemente la tensión, el material aislante se verá obligado a electrificarse, puesto que a medida que la tensión va en aumento, creará un campo magnético que se expande para desplazar aún más los electrones orbitales del material, y llegará el momento en que la intensidad del campo electrostático produce la perforación del material dieléctrico, haciéndolo conductor de la electricidad. Cuando ocurre esto, el material deja de servir como aislante. Esta

TABLA 10-2 CONSTANTES DIELÉCTRICAS DE MATERIALES NO CONDUCTORES

Material	Constante (K)
Aire	1
Bakelita	6.6 a 16
Tela (barnizada)	3.5 a 5.5
Vidrio (endurecido)	5.5 a 10
Mica	3 a 6
Papel (impregnado con aceite o cera)	2.5 a 4
Cuarzo	4.3 a 5.1
Goma	2.5 a 3
Pizarra	6 a 7
Azufre	4

avería puede ocurrir en cualquier material aislante; sin embargo, la intensidad del campo requerida (potencia del campo electrostático en líneas de fuerza por superficie dada), también llamada a veces gradiente de potencial, es distinta para cada material. En el caso de dieléctricos de aire o líquidos, esta avería es sólo temporaria. Sin embargo, en un material sólido es permanente.

La tensión dieléctrica de un material se expresa en volt o kilovolt por centímetro de espesor del dieléctrico, o sea, la relación o cociente existente entre la cantidad de tensión aplicada y el espesor del dieléctrico en el lugar de la avería. El gradiente de tensión o de potencial es igual a la tensión dieléctrica en el instante que se produce el arco en el material aislante.

Constante dieléctrica

La *constante dieléctrica* de un material dieléctrico se define como el cociente de la capacidad de un condensador con ese material como dieléctrico, y la capacidad de ese mismo condensador usando aire como dieléctrico.

$$K = \frac{\text{Capacidad de un capacitor con cualquier dieléctrico}}{\text{Capacidad del mismo capacitor con dieléctrico de aire}} \qquad (10\text{-}1)$$

donde:

K = constante dieléctrica.

Se ha encontrado que la mayoría de los dieléctricos en forma de gases tienen más o menos la misma constante que el aire, mientras que la mayoría de los sólidos y líquidos no conductores tienen una constante más alta que el aire. El aire es usado como referencia para las constantes dieléctricas, puesto que es el material no conductor más abundante. Si midiéramos la capacidad de dos conductores idénticos en tamaño y forma, ambos con dieléctrico de aire, y aplicáramos la fórmula (10-1), el valor de K (constante dieléctrica), sería igual a 1. En consecuencia, se designa con el número 1 la constante dieléctrica del aire. Si se comparan las capacidades de dos capacitores iguales, uno con dieléctrico de mica y el otro, de aire, la capacidad del que tiene mica será mayor puesto que la potencia dieléctrica de la mica es mayor que la del aire. En consecuencia, cuando se sustituyen en la fórmula el alto valor de capacidad del capacitor con dieléctrico de mica y el valor bajo de capacidad del que tiene dieléctrico de aire, el valor de K será mayor que 1:

$$K = \frac{\text{Capacitor dieléctrico de mica } 450 \text{ micro-microfaradio}}{\text{Capacitor de dieléctrico de aire } 75 \text{ micro-microfaradio}}$$

$$K = \frac{450 \text{ micro-microfaradio}}{75 \text{ micro-microfaradio}}$$

$$K = 6$$

En consecuencia, la constante dieléctrica (K) de la mica es 6 cuando se la refiere al aire. La tabla 10-2 muestra las constantes dieléctricas de varios materiales no conductores; la constante puede variar a medida que varía la calidad del material, como en el caso de la mica (de 3 a 6). Todas las constantes se dan referidas al aire.

Densidad del campo electrostático

Se ha explicado anteriormente que a medida que aumenta la tensión aplicada a un capacitor, aumentará también el número de líneas de fuerza electrostática entre las placas (en el dieléctrico). Se puede comparar la *densidad del flujo* de los campos dieléctricos, para determinar la calidad del material dieléctrico, utilizando la siguiente fórmula:

$$D = \frac{KG}{300} \qquad (10\text{-}2)$$

donde:

D = densidad del flujo, en líneas por centímetro cuadrado
K = constante dieléctrica
G = Gradiente de tensión, en volt por centímetro de espesor del dieléctrico
300 = constante obtenida por experimentación

Como ejemplo, se puede comprar la densidad del flujo relativo electrostático, para dos capaci-

tores con dieléctrico de aire y mica. Se supone que el gradiente de tensión es 5000 volt por centímetro.

$$D_{aire} = \frac{KG}{300} = \frac{1 \times 5.000}{300} \qquad D_{mica} = \frac{KG}{300} = \frac{6 \times 5.000}{300}$$

$D_{aire} = 16{,}7$ líneas cm² $D_{mica} = 100$ líneas cm²

Esto ilustra el efecto de la constante dieléctrica con respecto al número de líneas de fuerza concentradas en una superficie dada.

Otro factor que interviene en la determinación del campo electrostático presente entre dos placas, es la superficie de las mismas. Cuando se aplica este factor en expresiones matemáticas, se logra determinar el total de las líneas de flujo producidas por un capacitor. La expresión matemática que se utiliza es:

$$\Psi = \frac{EKA}{300\,l} \qquad (10\text{-}3)$$

donde:

Ψ = total de las líneas de flujo electrostático
E = tensión aplicada al capacitor
A = área total por la cual pasan las líneas electrostáticas (superficie de una placa) en centímetros cuadrados
l = longitud del campo electrostático en centímetros (espesor del dieléctrico)

El símbolo Ψ (letra griega psi) se usa para evitar una confusión con B, que indica las líneas de flujo magnético. Esta expresión contiene todos los factores que afectan la densidad del campo electrostático total entre las dos placas.

Es evidente, según lo estudiado sobre la relación entre las propiedades dieléctricas del medio entre dos cuerpos y las líneas de fuerza electrostática producidas entre los mismos, que la cantidad de carga presente está directamente relacionada con el numero de líneas de fuerza concentradas en una superficie dada. De la fórmula (10-3) se ve que a un aumento de tensión, de constante dieléctrica, o de la superficie, se producirá un aumento relativo en la totalidad de las líneas de fuerza. Asimismo, se debe recordar que la tensión dieléctrica es el factor que expresa el máximo número de líneas de fuerza electrostáticas posibles, antes de que sean destruidas las propiedades aislantes de un dieléctrico.

Factores físicos que afectan la capacidad

Ya se han visto algunos de los factores que afectan la capacidad. Se verá ahora su integración en la expresión matemática de la capacidad en farad.

Se han utilizado la constante dieléctrica (K), el gradiente de potencial, y la superficie de las pla-

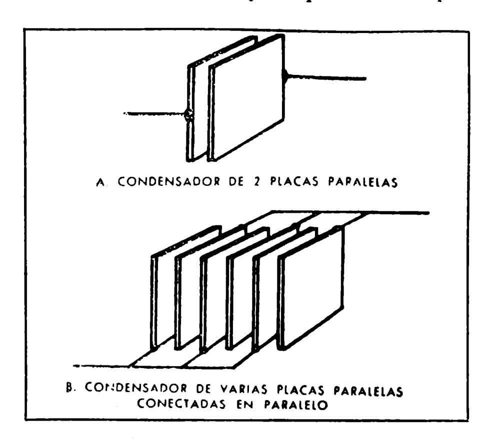


Figura 10-18. Estructura fundamental del condensador

cas, en el cálculo del campo electrostático total existente entre dos placas paralelas. Mediante estos tres factores físicos y sus efectos sobre el número total de líneas de flujo, se obtiene la siguiente expresión matemática para determinar la capacidad de un capacitor de dos placas, sin tener en cuenta la tensión aplicada:

$$C = 0{,}224\,\frac{KA\,(N\text{-}1)}{t} \qquad (10\text{-}4)$$

donde:

C = capacidad en µµF
A = área de una placa del capacitor, en pulgadas cuadradas
K = constante dieléctrica
N = número de placas
t = distancia entre las placas, o espesor del dieléctrico, en pulgadas
0,224 = constante utilizada para obtener el valor de capacidad en µµF, cuando las dimensiones se expresan en pulgadas.

Con esta fórmula, se puede hallar la capacidad de un capacitor de dos placas con dieléctrico de mica de 1-mil de espesor y una superficie de placa de 5 pulgadas cuadradas, como sigue:

$$C = \frac{0{,}224\ KA\ (N\text{-}1)}{t}$$
$$= \frac{0{,}224 \times 6 \times 5\ (2\text{-}1)}{1 \times 10^{-3}}$$
$$= \frac{0{,}224 \times 30}{1 \times 10^{-3}}$$
$$C = 6720\ \mu\mu F = 0{,}00672\ \mu F$$

Esta fórmula puede utilizarse para determinar la capacidad de un capacitor con cualquier número de placas, así como de uno de dos placas como se acaba de ver. Cuando tenemos un capacitor de más de dos placas paralelas, como en la parte B de la figura 10-18, la fórmula no cambia, sólo varía el valor de N de acuerdo con el número de placas. Si se aumenta N, como se puede ver en la fórmula (10-4), es lo mismo que si se aumentara la superficie de las placas.

Con la fórmula (10-4) se puede calcular la capacidad de un capacitor de 6 placas, con las mismas dimensiones que en el ejemplo anterior:

$$C = \frac{0{,}224\ KA\ (N\text{-}1)}{t}$$
$$= \frac{0{,}224 \times 6 \times 5\ (6\text{-}1)}{1 \times 10^{-3}}$$
$$= \frac{0{,}224 \times 30 \times 5}{1 \times 10^{-3}}$$
$$C = 33{,}600\ \mu\mu F = 0{,}0336\ \mu F$$

En consecuencia, es evidente que el aumento del número de placas provocó un aumento correspondiente en la capacidad. Asimismo, si se aumenta el valor de t, decrecerá el valor de capacidad, puesto que esta última es inversamente proporcional a la distancia entre las placas.

A continuación se destacan los puntos fundamentales a recordar sobre capacidad y capacitores:

1. La capacidad es la propiedad de un circuito que se opone a cualquier cambio de la tensión del mismo.

2. El capacitor es un elemento que suministra capacidad a un circuito. Los factores físicos que determinan el valor de capacidad disponible para el circuito son:

   a. tipo del material dieléctrico
   b. superficie de las placas
   c. número de placas
   d. espacio entre las placas (que es el espesor del dieléctrico)

3. Un capacitor almacena energía en un campo electrostático, en forma de carga eléctrica.

Factores eléctricos que afectan la capacidad

Ya se ha explicado que la capacidad de un capacitor está determinada por los factores físicos: superficie de las placas, espacio y tipo de dieléctrico. Eléctricamente, la cantidad de carga eléctrica que puede almacenar el campo electrostático de un capacitor, depende de la capacidad y de la magnitud de la tensión aplicada al capacitor. Se puede desarrollar una relación entre estos tres factores, a fin de calcular la cantidad de carga de un capacitor, para determinada tensión aplicada. Esta ecuación es la siguiente:

$$Q = C\,E \qquad (10\text{-}5)$$

donde:

Q = carga almacenada, en coulomb
E = tensión aplicada
C = capacidad en faradio

Como ejemplo, supóngase que un capacitor tiene un valor marcado de 1 microfaradio, y una tensión aplicada de 1000 volt. La cantidad de carga será:

$$Q = C\,E \qquad (10\text{-}5)$$
$$= 1 \times 10^{-6} \times 1000$$
$$Q = 1 \times 10^{-3}\ \text{coulomb}$$

La ecuación (10-5) puede ser transpuesta, en forma similar a las ecuaciones de las leyes de Ohm, para resolver cualquiera de los tres factores.

$$Q = CE \qquad C = \frac{Q}{E} \qquad E = \frac{Q}{C} \qquad (10\text{-}6)$$

Si se relacionan los factores eléctricos con los factores físicos conocidos, se pueden enunciar los siguientes puntos importantes:

1. La cantidad total de electrones almacenados depende de la capacidad y de la tensión aplicada.
2. El valor de la capacidad depende de las dimensiones físicas del capacitor.
3. El valor máximo de la tensión aplicada depende de la tensión dieléctrica.

Cálculo de la energía almacenada de un condensador

El cálculo de la tensión (trabajo o energía) almacenada en un capacitor se asemeja al cálculo de la potencia disipada por un resistor. En la sección 8-4 se calculó la potencia disipada en un resistor (P, en watt) multiplicando la corriente en el resistor (I, en ampere) por la caída de tensión a través del resistor (E, en volt). Se utilizó la fórmula P — EI.

En un inductor, se encontró que la potencia o energía almacenada en un campo electromagnético es proporcional al cuadrado de la corriente que formó el campo. La fórmula usada es:

$$W = 1/2\ LI^2 \qquad (10\text{-}7)$$

donde:

W = energía almacenada, en joule
L = inductancia de la bobina
I = corriente de la bobina

Esta fórmula es verdadera porque el flujo de corriente por la bobina es lo que creó el campo electromagnético. Recuérdese que una bobina tiene la propiedad de inductancia, o sea que puede oponerse a un cambio de la intensidad de la corriente.

El capacitor, sin embargo, tiene la propiedad de capacidad, o sea que puede oponerse a un cambio de la tensión. Asimismo, en un capacitor se utiliza, para almacenar la energía, un campo electrostático que es creado por una tensión en lugar de una corriente, puesto que la corriente continua no fluye por el capacitor. En consecuencia, la energía almacenada en un capacitor es proporcional al cuadrado de la tensión aplicada, y se encuentra utilizando la siguiente fórmula:

$$W = 1/2\ C E^2 \qquad (10\text{-}8)$$

donde:

W = energía almacenada, en joule
C = capacidad del capacitor
E = f.e.m. o tensión aplicada.

Ejemplo: la energía almacenada en un capacitor de 1 microfaradio, con una aplicación de 5000 volts, se encuentra de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} W &= 1/2\ CE^2 \\ &= 1/2\ (1 \times 10^{-6}) \times (5 \times 10^3)^2 \\ &= 1/2\ (1 \times 10^{-6}) \times (25 \times 10^6) \\ W &= 12{,}5 \text{ joule} \end{aligned}$$

10-7 EFECTOS DE CAPACIDAD EN CIRCUITOS DE CORRIENTE CONTINUA

El efecto de capacidad en un circuito se nota solamente cuando hay un *cambio* en la tensión aplicada al circuito. Si la tensión aplicada aumenta, la capacidad en el circuito tenderá a oponerse al aumento de tensión elevándose a una fuerza igual y contraria. Si se disminuye la tensión aplicada a un circuito que contiene capacidad, el capacitor descargará su energía almacenada a un nivel igual a la tensión disminuida. Es decir, tratará de oponerse a una disminución en la tensión, entregando su energía acumulada al circuito.

En el capítulo precedente sobre inductancia, se explicó el origen del aumento y la disminución de la corriente cuando se coloca un inductor en un circuito de corriente continua. Se encontró que la corriente del circuito aumentaba exponencialmente a su máximo valor, según la resistencia presente en el circuito. Existe una condición similar en un circuito de C.C. con capacidad, con la excepción de que es la tensión a través de las placas del capacitor la que aumenta en forma exponencial.

Aumento de tensión en un capacitor común

Antes de tratar el aumento de tensión en un circuito capacitivo, se deben establecer varios puntos. Cuando un capacitor está en descarga, hay un número igual de electrones libres en cada placa; en consecuencia, no existe diferencia de potencial entre las mismas. Colocado el capacitor a través de los terminales de una fuente de tensión, como en la fig. 10-19, los electrones son instantáneamente forzados a moverse de una placa superior al terminal positivo de la batería, a través de la misma (sin tener en cuenta la resistencia interna), y a depositarse en la placa inferior del capacitor. Los electrones se seguirán moviendo en la dirección indicada por el circuito (pero no a través del capacitor), hasta el momento en que la diferencia entre las placas del capacitor, debido a la acumulación de carga, es igual a la tensión aplicada. Cuando la tensión a través de la placa iguala la tensión aplicada, cesa la corriente por el circuito.

Si se supone que se deposita 1 coulomb de carga en la placa negativa del capacitor en un segundo, la corriente en el circuito es de un ampere

($I = \dfrac{Q}{t}$). Como se mencionó antes, la cantidad de carga almacenada en un capacitor depende del valor de capacidad y de la tensión aplicada ($Q - CE$). La cantidad CE puede sustituirse por Q, en la condición vista más arriba, resultando la siguiente expresión:

$$I = \frac{CE}{t} \qquad (10\text{-}9)$$

Esta fórmula indica que la corriente en el circuito (el ritmo de cambio de carga) depende del ritmo de tensión, puesto que el valor de capacidad es fijo. Se la puede modificar para indicar un cambio en el aumento de la tensión y del tiempo, en forma similar a la fórmula de la fuerza electromotriz inducida usada para la inductancia.

$$i = C \frac{\Delta e}{\Delta t} \qquad (10\text{-}10)$$

donde:

i = Corriente del circuito
C = Capacidad en farad
Δe = Incremento en tensión
Δt = Incremento en tiempo

Con la expresión anterior, sustituyendo valores: Δe es igual a 10 volt, Δt es igual a un segundo, y C es igual a un faradio. O sea:

$$i = C\frac{\Delta e}{\Delta t}$$

$$= 1 \times \frac{10}{1}$$

$$i = 10 \text{ coulomb por segundo}$$
o sea 10 ampere

La fórmula anterior para la variación de la corriente revela dos importantes relaciones: primero, la cantidad de corriente que fluye en un circuito será mayor si la capacidad aumenta; segundo, la cantidad de corriente será mayor si el ritmo de cambio de la tensión aumenta. La ecuación también define el faradio como la capacidad presente en un circuito en el cual un cambio de tensión aplicada de un volt por segundo, resulta en un cambio de carga de un ampere.

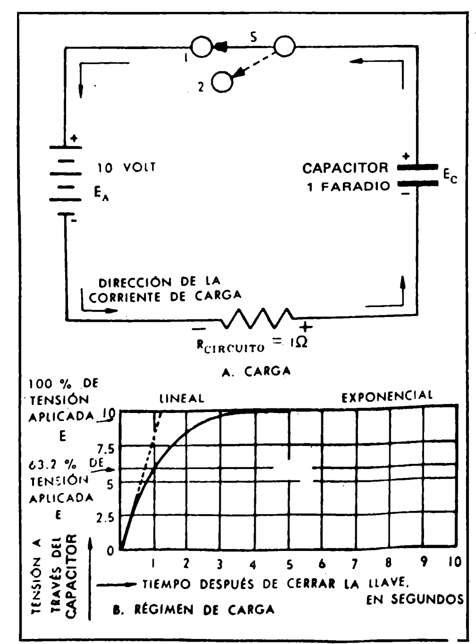


Figura 10-19. Aumento de tensión de un capacitor real

Si se considera nuevamente la corriente del circuito hallado precedentemente, se aprecia que el ritmo de cambio de la carga en el capacitor sería lineal, si la corriente de carga se mantuviera constante en 10 ampere. Este aumento lineal en la tensión alimentada a través de las placas de un capacitor se representa con una línea punteada en la parte B de la figura 10-19. En la práctica, tal aumento en la carga del capacitor nunca ocurre, pues, para ello, la tensión aplicada al circuito debe aumentar linealmente al mismo ritmo.

Si se observa nuevamente la parte B de la figura 10-19, se ve que el aumento exponencial de carga en el capacitor es la condición actual que se obtiene en cualquier elemento capacitivo colocado en un circuito de corriente continua. Los efectos de la resistencia del conductor y la resistencia interna de la batería se agrupan en una resistencia representativa, $R_{circuito}$ (véase la parte A de la figura). Puesto que hay resistencia presente en el circuito, ésta limitará el flujo de la corriente de carga cuando se cierra el circuito.

A fin de apreciar cómo se produce el aumento exponencial de carga de un capacitor, síganse los siguientes puntos:

1. Cuando se cierra la llave, fluirá la máxima corriente de carga:

$$I_{circuito} = \frac{E}{R} = \frac{10}{1} = 10 \text{ ampere}$$

2. El ritmo inicial de carga en el capacitor será:

$$\frac{\Delta e}{\Delta t} = \frac{i}{C} = \frac{10}{1} = 10 \text{ volt por segundo}$$

3. Sin embargo, tan pronto como el capacitor comience a tomar una carga, la tensión desarrollada en sus placas se opone a la tensión aplicada y, en consecuencia, reduce la tensión total del circuito. Por ejemplo, en el instante de tiempo en que existe una carga de 5 volt en el capacitor, la tensión del circuito será:

$$E_{circuito} = E_A - E_c$$
$$= 10 - 5$$
$$E_{circuito} = 5 \text{ volt}$$

4. La reducción en la tensión del circuito produce una disminución proporcional en la corriente del mismo.

$$I_{circuito} = \frac{E}{R} = \frac{5}{1} = 5 \text{ ampere}$$

5. En consecuencia, el ritmo de carga del capacitor ha cambiado de 10 volt por segundo a 5 volt por segundo (nótese la curva en la parte B en la figura 10-19).

$$\frac{\Delta e}{\Delta t} = \frac{i}{c} = \frac{5}{1} = 5 \text{ volt por segundo}$$

6. A medida que pasa el tiempo, la tensión del circuito disminuye, provocando una disminución en el ritmo de carga del capacitor.
7. Si se sigue la curva exponencial en la parte B de la figura 10-19, se puede ver que el ritmo de cambio más grande ocurre en el primer segundo de tiempo.
8. A medida que pasa el tiempo, la tensión a través del capacitor todavía aumenta hacia el potencial de la batería, pero el ritmo de carga disminuye constantemente debido a la disminución total constante de la tensión del circuito.

De acuerdo con lo expuesto, es evidente que la tensión de un capacitor común aumenta exponencialmente con la resistencia inherente del circuito, limitando la corriente de carga inicial. El capacitor se carga primero a un ritmo rápido y este ritmo decrece con el tiempo, a medida que aumenta la tensión, oponiéndose a la tensión aplicada al circuito.

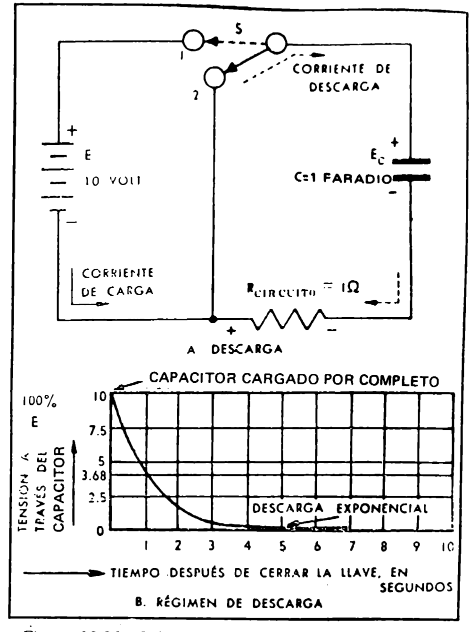


Figura 10-20. Caída de tensión de un capacitor real

Caída de tensión en un capacitor común

El ritmo de descarga de un capacitor también sigue una curva exponencial. En la fig. 10-20, se ve que el circuito ha sido modificado con respecto a la figura 10-19, por el agregado de una conexión en cortocircuito a través de la resistencia del circuito y del capacitor y la desconexión de la f.e.m. aplicada. El gráfico en la parte B de la figura supone que el capacitor ha estado a carga máxima por un período de tiempo antes del período cero. En el período cero, la llave se lleva a la posición 2. Instantáneamente el capacitor comenzará a descargarse, puesto que es la única fuente de tensión en el circuito. La descarga inicial de corriente del capacitor será bastante grande; sin embargo, es limitada por la resistencia del circuito a 10 ampere. A medida que pasa el tiempo, la f.e.m. en las placas decrece debido a una pérdida de carga, y la corriente de descarga disminuye. Se debe notar en el gráfico (parte B de la fig. 10-20), que, en el tiempo de un segundo, la cantidad de carga en las placas del capacitor ha disminuido 63,2 % de su máximo valor. Todos los otros puntos sobre los dos gráficos, corresponden a porcentajes de carga o descarga en los intervalos de tiempo indicados. En consecuencia, el aumento y la disminución de tensión siguen una curva exponencial en la cual los ritmos de aumentos y disminuciones son idénticos. Las curvas respectivas son inversas.

Tiempo R-C

En el tema anterior, se vió que el elemento tiempo intervino en la determinación del tiempo total necesario para que el capacitor alcance una carga equivalente a la tensión aplicada, o para descargarse completamente de la tensión recibida. En los circuitos de las figuras 10-19 y 10-20 este tiempo fue de cinco segundos. Si la resistencia del circuito fuera cambiada de 1 ohm a 2 ohm, la oposición al flujo de la corriente sería doble, resultando en un ritmo inicial de carga de 5 volt por segundo. En la figura 10-21 se hace una comparación de las curvas de carga para resistencia de circuito de 1 y 2 ohm. Se debe notar que cada una de las curvas sigue un aumento exponencial; sin embargo, para una resistencia de circuito de 2 ohm, el ritmo de aumento es la mitad de aquél que tiene la resistencia del circuito de 1 ohm. También se puede ver que el

tiempo requerido por el capacitor para llegar a 63,2 % de la tensión aplicada es igual a 1/5 del tiempo total requerido para alcanzar la carga total.

De la comparación dada en la fig. 10-21 se puede ver que existe una relación entre el ritmo de carga, la resistencia y la capacidad de un circuito. Esto es similar al tiempo R-L de un inductor, siendo un tiempo R-L el tiempo requerido para que la corriente del circuito alcance a 63,2 % de su valor total.

El tiempo de carga y descarga se determina por el producto de R y C en el circuito considerado. Este producto es denominado constante de tiempo y se representa como sigue:

$$t = RC \qquad (10\text{-}11)$$

donde:

t = tiempo en segundos
R = resistencia en ohm
C = capacidad en faradio

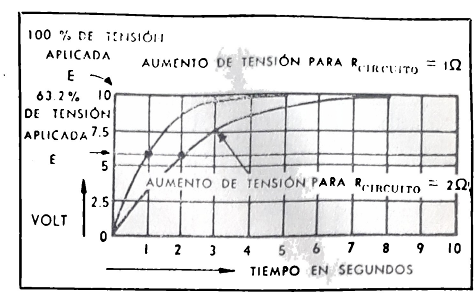


Figura 10-21. Comparación del régimen de carga

La tabla 10-3 presenta las maneras de expresar el valor de tiempo R-C.

La constante de tiempo R-C es el tiempo requerido por el capacitor para cargarse al 63,2 o/o de la

Disposición típica del equipo necesario para el estudio del efecto que produce el cambio de componentes del circuito, sobre la constante de tiempo de una red R-C en serie

TABLA 10-3. VALORES REPRESENTATIVOS DEL TIEMPO R-C

Tiempo	Resistencia	Capacidad
Segundos	Ohm	Faradio
Segundos	Megohm	Microfaradio
Microsegundos	Ohm	Microfaradio
Microsegundos	Megohm	Micro-microfaradio

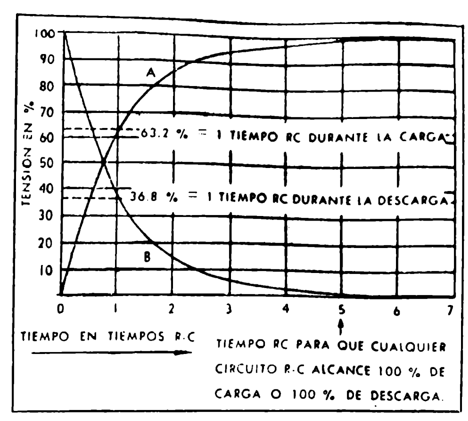


Figura 10-22. Carta universal de la constante de tiempo

tensión aplicada, o para descargarse a un 36,8 % de la tensión recibida. En forma similar al aumento de corriente en un circuito inductivo, se requieren 5 tiempos R-C para que el capacitor obtenga una carga equivalente a la tensión aplicada. En realidad, un capacitor nunca alcanza al 100 o/o de la tensión aplicada, debido a la pérdida de resistencia en el circuito; sin embargo, en la práctica, después de 5 R-C intervalos de tiempo se presume que el capacitor está totalmente cargado o descargado.

Según estas deducciones, se ha desarrollado un gráfico patrón para analizar las curvas de aumento y disminución de tensión de cualquier circuito R-C. Este gráfico, puesto que es aplicable a cualquier circuito R-C, se conoce como el *"Gráfico universal de la Constante de Tiempo"*, y se muestra en la fig. 10-22. Este mismo gráfico muestra el aumento de tensión (A) y la caída (B), con los porcientos de tensión aplicados en la línea vertical del mismo, y el tiempo en *tiempos R-C* en la línea horizontal. El producto R veces C para cualquier circuito R-C será de 1 tiempo R-C; en consecuencia, el porcentaje de carga o descarga se puede encontrar para cualquier circuito R-C para cualquier cantidad de tiempos R-C.

Como ejemplo del uso de este gráfico, supóngase que se desea determinar el porcentaje, o valor de la tensión que ha cargado un circuito R-C, después de 2 tiempos R-C, con una aplicación de 100 volt. La constante R-C (2) se encuentra primero en el Gráfico Universal de la Constante de Tiempo; entonces se sigue la línea vertical por encima del punto de tiempo 2 R-C en la escala del gráfico, hasta que se corta con la curva A, o sea la curva de carga. En el punto donde se cortan estas dos líneas se traza una línea imaginaria horizontal hacia el lado izquierdo del gráfico, y se encuentra así el porcentaje de carga para cualquier circuito R-C, después de dos intervalos de tiempo R-C. En este caso, el porcentaje de carga es aproximadamente 87 %. En consecuencia, si se aplican 100 volt a un circuito R-C por una cantidad de tiempo igual a dos R-C, el capacitor poseerá una carga equivalente a 87 volt.

Este gráfico, aunque aplicado en este capítulo a la tensión variable de corriente continua, se utilizará más adelante en una forma más amplia cuando se emplee en circuitos R-C de corriente alternada.

Se puede aplicar una tabla similar a la de la figura (10-12) para circuitos R-L si la escala vertical representa porcentajes de aumento y disminución de *corriente*, y la línea horizontal tiempos R-L, los cuales son calculados dividiendo L (inductancia) por R (resistencia).

10-8 CAPACITORES COMBINADOS

Cuando se combinan capacitores en circuitos en serie y en paralelo, entran en la determinación de la capacidad total de las combinaciones los factores físicos correspondientes a los capacitores simples: constante dieléctrica, espesor del dieléctrico, y superficie de las placas.

Capacitores en serie

Un número de capacitores de igual valor, conectados en serie como se muestra en la parte A de la figura 10-23, es exactamente lo mismo que una cadena de capacitores conectados con sus placas en forma alternada. La superficie de placa de la totalidad del grupo puede considerarse como superficie efectiva de la primera y última placa de la serie solamente. Se considera la constante dieléctrica común (siempre que todos los capaci

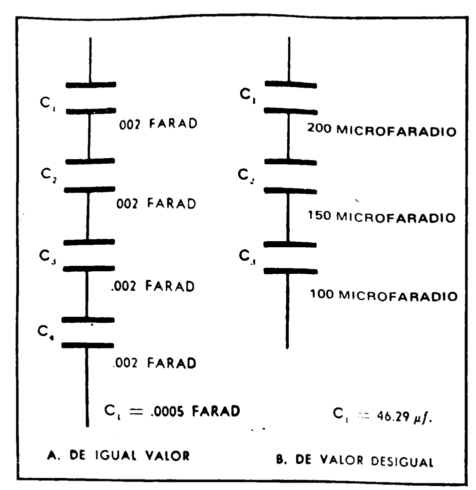


Figura 10-23. Capacitores conectados en serie

tores en serie utilicen el mismo material). El factor que todavía queda por considerar es el espesor del dieléctrico. Cuando se han conectado los capacitores en serie, el espesor total del dieléctrico se considera igual a la suma de los espesores de los dieléctricos individuales. En la fórmula

$$C = \frac{0{,}224\ KA\ (N-1)}{t}$$

si el espesor (t) del dieléctrico aumenta, el valor de capacidad decrece. En consecuencia, cuando se conectan capacitores iguales en serie, la capacidad total decrece. Así, se utiliza una fórmula similar a la empleada para determinar la resistencia paralela total, y se puede establecer que los capacitores en serie se adicionan o combinan como las resistencias en paralelo. La fórmula utilizada es:

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4} \qquad (10\text{-}11)$$

Esta fórmula puede ser simplificada a:

$$C_t = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4}} \qquad (10\text{-}12)$$

Los valores de los capacitores en la parte A de la figura 10-23, pueden sustituirse en la fórmula, y se puede hallar así su capacidad total.

$$C_t = \frac{1}{\frac{1}{0{,}002} + \frac{1}{0{,}002} + \frac{1}{0{,}002} + \frac{1}{0{,}002}}$$

$$= \frac{1}{\frac{1+1+1+1}{0{,}002}} = \frac{1}{\frac{4}{0{,}002}}$$

$$= \frac{1}{2000}$$

$$C_t = 0{,}0005 \text{ faradio}$$

De los resultados del ejemplo anterior se nota que la capacidad final o total del circuito es igual a 1/4 del valor individual de cualquier capacitor del circuito. Esto se asemeja al método para combinar resistencias iguales en paralelo. Al aplicar este método a capacitores iguales en serie el valor de un capacitor dividido por el numero total de los mismos, da el valor efectivo de capacidad del circuito.

Cuando son distintos los valores de capacidad de los capacitores conectados en serie, se debe utilizar el método recíproco. En la parte B de la figura 10-23, se presenta un ejemplo de capacitores de valor desigual. Como ejercicio, compruébese los valores efectivos de capacidad indicados en la figura, utilizando la fórmula recíproca.

Capacitores en paralelo

Ya se ha determinado en este capítulo que la capacidad es directamente proporcional a la superficie de las placas del capacitor. En consecuencia, si se han conectado cuatro capacitores iguales en paralelo, como se muestra en la parte A de la figura 10-24, la superficie de la placa positiva y la negativa han sido aumentadas cuatro veces. La fórmula para calcular la capacidad en paralelo es similar a la utilizada para determinar la resistencia en serie. Dicha expresión es:

$$C_t = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \qquad (10\text{-}14)$$

Sustituyendo los valores de capacidad indicados en la parte A de la figura 10-24 en la ecuación, se encuentra que la capacidad total del circuito en paralelo es:

$$C_t = 400\,\mu F + 400\,\mu F + 400\,\mu F + 400\,\mu F$$
$$C_t = 1.600\,\mu F \text{ ó } 0{,}0016 \text{ farad}$$

El resultado se da generalmente en la unidad menor. Por lo visto, 1600 microfaradio es la capacidad total del circuito en paralelo. Nótese que en esta figura los valores son todos iguales y están todos en microfaradio.

En la parte B de la figura se muestran cuatro capacitores de valores desiguales. Para encon-

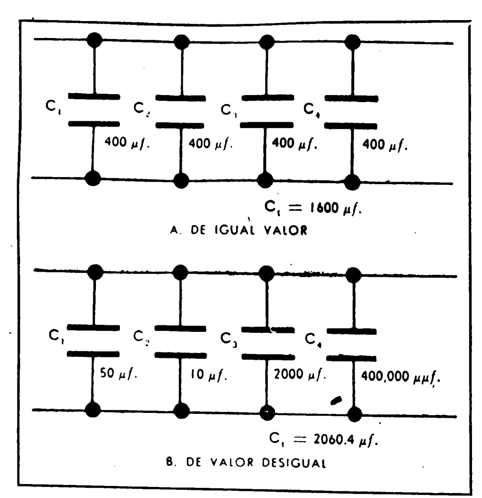


Figura 10-24. Capacitores conectados en paralelo

trar la capacidad total de este circuito se utiliza la misma fórmula; sin embargo, se debe cambiar todos los valores de los capacitores a microfaradio o micro-microfaradio antes de efectuar las operaciones:

$$C_t = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$$
$$= 50\,\mu F + 10\,\mu F + 2000\,\mu F + 400.000\,\mu\mu F$$
$$= 50\,\mu F + 10\,\mu F + 2000\,\mu F + 0{,}4\,\mu F$$
$$C_t = 2060{,}4 \text{ microfaradio.}$$

10-9 USOS Y APLICACIONES DE LOS CAPACITORES

Puesto que un capacitor se carga a un valor determinado de tensión aplicada de C.C. y se opone a la misma, se puede decir que un capacitor bloquea la corriente continua. El poder de un condensador para bloquear la corriente continua, y para dejar pasar corriente alternada (todavía no estudiada), permite su utilización en numerosas aplicaciones.

La capacidad tiene muchas aplicaciones en la manufactura de los equipos electrónicos, pero muchas de ellas no se tratarán en este capítulo, pues serán explicadas más adelante. Sin embargo, se describirán dos aplicaciones utilizando los conocimientos ya asimilados.

La primera, es la luz intermitente utilizada por las empresas de construcción para señalar peligro en las rutas en reparación. En la figura 10-25 se muestra el esquema del circuito de este aparato. El funcionamiento de este circuito depende de dos importantes principios: las características del tubo de neón y la constante de tiempo R-C para un circuito. Primero se describirá el funcionamiento de este tubo para entender mejor el funcionamiento del circuito.

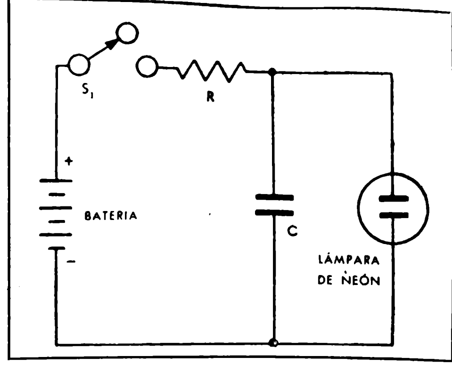


Figura 10-25. Circuito típico de luz intermitente de peligro

El tubo de neón consiste en dos electrodos colocados en un envoltorio o cápsula de vidrio, al cual se le ha sacado el aire reemplazándolo por gas neón. Este sistema tiene la ventaja de que no permite el flujo de corriente por los electrodos, mientras no se haya alcanzado una cierta tensión. A esto se lo llama "golpe de tensión" y, hasta que no se alcanza, el tubo de neón ofrecerá una resistencia muy alta a través de sus electrodos. Luego de efectuar el golpe, el tubo tendrá una resistencia muy baja (casi cero) a consecuencia de la ionización del gas neón con el potencial del golpe. Los iones de gas soportan el flujo de corriente entre los dos electrodos, de una manera muy parecida a los iones de la solución de un acumulador. Durante el período de ionización el tubo de neón brilla. Después que se ha aplicado el golpe de tensión y que el bulbo se ha iluminado, el potencial a través de los electrodos puede disminuirse sin extinguir la luz del tubo. Sin embargo, cuando el potencial se ha disminuido a un cierto punto, cesa la ionización, se detiene el flujo de la corriente y el tubo se apaga. Para iluminar nuevamente el tubo se debe aplicar otro golpe de tensión a los electrodos.

Las características de un tubo de neón pueden combinarse con un circuito R-C para lograr una luz intermitente de peligro. El funcionamiento de la luz de peligro de la figura 10-25 es el siguiente: cuando se cierra la llave S, la corriente comenzará a fluir cargando el capacitor. Como la

resistencia R está en serie con la corriente de carga la limita, aumentando, en consecuencia, el tiempo que C llevará para obtener una carga. La tensión a través de C, así como la tensión a través de los electrodos del tubo de neón, aumentará a un ritmo determinado por la constante R-C. Un momento después de haber cerrado la llave S, la tensión desarrollada a través de C es de magnitud suficiente para hacer dar el golpe que ioniza el tubo de neón. Cuando el tubo ilumina, se pone en corto-circuito y descarga el capacitor. La resistencia a través de los terminales es menor que la R en el circuito; por lo tanto, el tiempo de descarga de C es mucho menor que el tiempo de carga, y se ilumina de golpe el tubo de neón. Cuando se ha descargado el capacitor, el tubo se desioniza y la batería nuevamente proveerá potencia para recargar el capacitor. Esta condición se repite y de esta forma, el tubo se prenderá intermitentemente. La razón por la cual se usa el capacitor no es únicamente la de proveer la acción intermitente, sino proveer la descarga de la alta corriente inicial para hacer funcionar el tubo.

Otro ejemplo de un capacitor utilizado en un circuito C.C. lo tenemos en el equipo electrónico fotográfico para instantáneas (foto-flash). El tubo de este equipo difiere del tubo normal en que puede ser utilizado muchas veces. El tubo también difiere del tubo de neón en sus características internas, puesto que requiere una mayor tensión de golpe y produce al ionizarse una luz de distinto color. Un circuito típico se muestra en la figura 10-26. Cuando la llave está en posición 1, el condensador está conectado directamente a través de la batería y se carga con el potencial de la misma. La llave está acoplada mecánicamente con el obturador de la cámara. Cuando se abre el obturador, la llave pasa a la posición 2, momento en el cual la tensión total del capacitor se aplica a través de la lámpara provocando su iluminación.

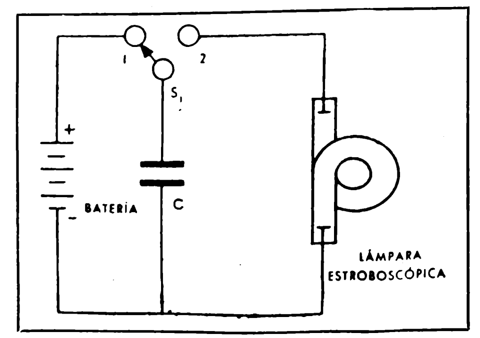


Figura 10-26. Circuito electrónico típico para tomas fotográficas ("flash" electrónico)

10-10 RESUMEN

Se puede decir que existe un capacitor cuando dos cuerpos conductores están separados por un dieléctrico. La capacidad es la propiedad de un circuito eléctrico que almacena energía electrostática de manera tal, que la f.e.m. resultante se opone a cualquier cambio de tensión en el circuito. La carga almacenada en el capacitor se debe a la elasticidad de las órbitas de los electrones en el material dieléctrico.

La construcción física de un capacitor determina su valor de capacidad. Esto se expresa por la fórmula:

$$C = \frac{0{,}224\ K\ A\ (N-1)}{t}$$

Se debe recordar que si aumenta la constante dieléctrica (K), la superficie de una placa (A), o el número de placas (N), la capacidad aumenta. Asimismo, un aumento en el espesor del dieléctrico (t) producirá una disminución en la capacidad. Si estos valores están en pulgadas se utiliza la constante 0,224, y si está en centímetros, se utiliza 0,0883.

Si se aplica una tensión a un capacitor, fluye instantáneamente una corriente de carga a un ritmo máximo, y luego decrece a 0, a medida que la cantidad de tensión almacenada a través del condensador alcanza el valor de la tensión aplicada. Puede determinarse el ritmo instantáneo de carga del condensador insertando el valor de carga de corriente y capacidad en la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta e}{\Delta t} = \frac{i_c}{C}$$

La constante de tiempo R-C de un capacitor es el producto de R × C. La constante de tiempo es el tiempo requerido por un capacitor para cargarse a 63,2 % de la tensión aplicada, o descargarse a un 36, 8 % de la tensión recibida. El tiempo requerido por cualquier condensador para cargarse o descargarse por completo es de cinco veces la constante R-C.

Los capacitores colocados en serie se combinan en forma similar a las resistencias en paralelo en cuanto se refiere a la capacidad efectiva. Esto se debe al incremento efectivo del espacio dieléctrico. Los capacitores colocados en paralelo se combinan en forma similar a las resistencias en serie, puesto que la superficie efectiva de las placas se aumenta.

CUESTIONARIO

1. ¿Qué es un capacitor ?
2. ¿Qué es la capacidad?
3. ¿Cuál es la fórmula para encontrar la capacidad con los factores eléctricos dados?
4. ¿Cómo se encuentra la constante dieléctrica (K) de un material aislante?
5. Defina la tensión dieléctrica.
6. ¿Cómo varía la capacidad con respecto a:
   A. la superficie de las placas paralelas
   B. el espesor del dieléctrico
   C. la constante dieléctrica.
7. ¿En qué difiere un capacitor de un inductor, en términos de reacción a la corriente continua o tensión?
8. Defina las condiciones eléctricas que deben existir para que se pueda obtener una capacidad de un faradio.
9. ¿Qué ocurre con los electrones orbitales de un material dieléctrico cuando se ha aplicado una carga al capacitor?
10. Enuncie dos unidades de capacidad de uso común.
11. ¿Cuál es la principal desventaja de un capacitor de papel que posee un alto valor de capacidad?
12. ¿Qué indica el alcance de tensión de un capacitor?
13. ¿Qué tipo de capacitor tiene un gran valor de capacidad en comparación con su pequeño tamaño?
14. ¿Cuál es la principal desventaja del capacitor con electrólito húmedo?
15. En el capacitor con electrólito húmedo, indique qué parte sirve como:
    a. placa positiva después del proceso de formación.
    b. placa negativa después del proceso de formación.
16. ¿Qué se entiende como pérdida?
17. ¿Qué tipo de capacitor tiene la mayor cantidad de pérdida?
18. En los capacitores de aceite, qué es lo que sirve como dieléctrico?
19. ¿Pueden los capacitores de aceite almacenar una carga por mucho tiempo?
20. ¿Qué tipo de capacitor tiene mayor alcance de tensión?
21. ¿Dónde se encuentran más comunmente los capacitores de placas paralelas variables?
22. ¿Qué dos principios físicos utilizan los capacitores variables para cambiar su valor de capacidad?
23. ¿De qué material están construidas las placas de los capacitores tubulares de cerámica?
24. En el código de colores de 6 puntos, el primer punto negro significa ....
25. Contestar las preguntas a, b y c, con respecto a un capacitor tubular de papel con bandas de los siguientes colores: rojo, anaranjado, amarillo, verde y azul.
    a. valor de capacidad en microfaradio.
    b. valor de tolerancia en tanto por ciento
    c. alcance de tensión
26. Contestar las preguntas a, b y c, con respecto a un capacitor de mica con sistema de código de 5 puntos con los siguientes colores: amarillo, violeta, amarillo, plateado y verde.
    a. valor de capacidad
    b. alcance de tensión
    c. tolerancia.
27. Dado un capacitor con un dieléctrico de 0.05 centímetros, al que se aplican 500 volt ¿cuál es el gradiente de tensión?
28. Si el gradiente de tensión es de 300.000 volt por centímetro y la constante dieléctrica es 4 ¿cuál es la densidad de flujo por unidad de superficie que se puede formar en este material?
29. ¿Cuál es la fórmula para encontrar la totalidad de las líneas de flujo de un campo electrostático?
30. ¿Cuánto tiempo tarda para cargarse al 100 % un condensador en serie de 10 microfaradio con un resistor de 10K ohm, y con 10 volt aplicados?
31. ¿Cuánto tiempo tardará el circuito arriba mencionado para descargarse a un 37 % de su carga total?
32. El tiempo R-C de un capacitor y un resistor en serie es de 1 segundo. Se aplica una tensión de 10 volt a este circuito por un segundo, y luego se permite al circuito descargarse por un segundo.
    a. ¿Habrá carga permanente en el capacitor?
    b. Si fuera así ¿cuántos volt?

Apéndice A.

ANTENA		EXPLOSOR FIJO	
		EXPLOSOR GIRATORIO	
ANTENA DE CUADRO		GENERADOR DE CORRIENTE ALTERNADA	
ANTENA DIPOLO			
ANTENA DIPOLO PLEGADA		GENERADOR DE CORRIENTE CONTINUA	G
BATERÍA			
CAPACITOR FIJO (LÁMINA METÁLICA EXTERIOR EN LOS CONDENSADORES DE PAPEL)		TIERRA	
CAPACITOR VARIABLE (ROTOR)		TIERRA (O CONTRAANTENA)	
		INDUCTOR FIJO, NÚCLEO DE AIRE	
CAPACITOR ELECTROLITICO	+	INDUCTOR FIJO, NÚCLEO DE HIERRO	
CRISTAL, DETECTOR DE	CATODO	INDUCTOR FIJO, NÚCLEO DE HIERRO PULVERIZADO	
CRISTAL PIEZOELÉCTRICO		INDUCTOR VARIABLE, NÚCLEO DE AIRE	
		INDUCTOR VARIABLE, NÚCLEO DE HIERRO	
AURICULARES		INDUCTOR VARIABLE, NÚCLEO DE HIERRO PULVERIZADO	
SEPARACIÓN DE ARCO		JACK COAXIAL	
SEPARACIÓN DE BOCINA			

JACK DE MICRÓFONO	
ENCHUFE OCTAL	8 1 2 3 4 5 6 7
JACK DE TELÉFONO	
JACK DE TELÉFONO (TIPO EN CORTOCIRCUITO)	
LLAVE	
LÁMPARA INCANDESCENTE	
LÁMPARA DE NEÓN	
PARARRAYOS	
INSTRUMENTO (LAS LETRAS INDICAN EL TIPO)	MA
MICRÓFONO	
MOTOR DE CORRIENTE ALTERNADA (BIFÁSICO)	
MOTOR DE CORRIENTE ALTERNADA (TRIFÁSICO)	
MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA	
PICK-UP FONOGRÁFICO	
FICHA DE CORRIENTE ALTERNADA	
FICHA OCTAL	8 1 2 3 4 5 6 7
CLAVIJA PARA TELÉFONO	
RELÉ	
RELÉ	CONTACTOS NORMALMENTE CERRADOS CONTACTOS NORMALMENTE ABIERTOS
RELÉ POLAR	P

RESISTOR FIJO		TRANSFORMADOR CON NÚCLEO DE AIRE	
RESISTOR CON DERIVACIÓN		AUTO-TRANSFORMADOR	
RESISTOR VARIABLE (POTENCIÓMETRO)		TRANSFORMADOR CON NÚCLEO DE HIERRO	
RESISTOR VARIABLE (REÓSTATO)		TRANSFORMADOR CON NÚCLEO DE HIERRO Y DERIVACIÓN CENTRAL	
ALTOPARLANTE, ELECTRODINÁMICO		TRANSFORMADOR CON NÚCLEO DE HIERRO Y BLINDAJE FARADAY	
ALTOPARLANTE, AUTODINÁMICO	PM	TRANSFORMADOR (CON ACOPLAMIENTO VARIABLE)	
LLAVE BIPOLAR		VÁLVULA DIODO	
LLAVE DE BOTON (NORMALMENTE ABIERTA) LLAVE DE BOTÓN (NORMALMENTE CERRADA)		VÁLVULA DOBLE TRIODO	
LLAVE UNIPOLAR		VÁLVULA PENTODO	
LLAVE UNIPOLAR DE 3 POSICIONES			
LLAVE BIPOLAR DE 4 POSICIONES			
TERMOELEMENTO			

VÁLVULA KLYSTRON REFLEX	
VÁLVULA TRIODO	
VÁLVULA TRIODO GASEOSA (THYRATRON)	
VÁLVULA V-R (DE CÁTODO FRÍO)	
VIBRADOR	
GUÍA DE ONDA	
GUÍA DE ONDA, ACOPLAMIENTO DE ABERTURA	EH
GUÍA DE ONDA, ATENUADOR (VARIABLE)	
GUÍA DE ONDA CON CORRECCIÓN CAPACITIVA	

GUÍA DE ONDA, UNIÓN TIPO E	E
GUÍA DE ONDA, UNIÓN TIPO H	H
GUIA DE ONDA CON CORRECCIÓN INDUCTIVA	
GUÍA DE ONDA, CARGA DE	
GUÍA DE ONDA, AJUSTE VARIABLE DE FASE	
GUÍA DE ONDA CON TRANSICIÓN COAXIAL CAPACITIVA (ABIERTA)	
GUÍA DE ONDA CON TRANSICIÓN COAXIAL CAPACITIVA (EN CORTO CIRCUITO)	
GUÍA DE ONDA CON TRANSICIÓN COAXIAL INDUCTIVA (VARIABLE)	
ALAMBRES CRUZADOS	
ALAMBRES UNIDOS	

BIBLIOGRAFÍA UTILIZADA COMO REFERENCIA

TEXTOS

1. *Principles of radio*, Henney and Richardson, John Wiley and Sons, Sexta edición, 1955.
2. *Essentials of Electricity for Radio and Television*, Slurzberg and Osterheld, McGraw-Hill, 1950.
3. *Practical Physics*, White, Manning and Weber, McGraw-Hill, Segunda edición, 1955.
4. *Direct and Alternating Currents*, Loew, McGraw-Hill, 1946.
5. *Analysis of Electric Circuits*, Middendorf, John Wiley and Sons, 1956.
6. *Mathematics for Electricians and Radiomen*, Nelson M. Cooke, McGraw-Hill, 1942.

MANUALES DE INSTRUCCIÓN TÉCNICA

1. *Physics for Electronics Technicians*, Bureau of Naval Personnel, 1951.
2. *Electrical Fundamentals (Direct Current)*, Departments of Army and the Air Force, 1951, TM 11-661, TO 16-1-218.
3. *Basic Electricity*, Bureau of Naval Personnel, 1956.
4. *Homestudy Course Device, 26-K-2*, U.S. Naval Training Devices Center, 1957.
5. *Radar Circuit Analysis*, Air Force Manual 52-8, Department of the Air Force, 1951.
6. *Training Manual — Electrical Power Equipment*, Philco Corporation, 1951, AN-195.
7. *Training Manual — Radio Communication Systems Measurements*, Philco Corporation, 1952, AN-252.
8. *Field Engineers' Data Handbook*, Philco Corporation, 1957, AN-407.
9. *Basic Electronic Circuits and Systems Training Course*, Philco Corporation, 1957, AN-217/218.

Indice

PÁG.

Prefacio v

Introducción vii

CAPÍTULO I — FUNDAMENTOS DE LA FÍSICA 1

1-1 Introducción — 1-2 Estructura atómica — 1-3 Conductores y aislantes — 1-4 Electricidad estática — 1-5 Resumen de estructura atómica y de la electrónica — 1-6 Mediciones — 1-7 Trabajo, energía, potencia y eficiencia — 1-8 Resumen

CAPÍTULO II — UNIDADES ELÉCTRICAS FUNDAMENTALES 20

2-1 Introducción — 2-2 Polaridad — 2-3 El volt — 2-4 El ampere — 2-5 El ohm — 2-6 Clasificación de la corriente eléctrica — 2-7 Elementos electrónicos y términos asociados — 2-8 Símbolos de corrientes y diagramas — 2-9 Potencias de diez — 2-10 Prefijos usados para unidades eléctricas — 2-11 Resumen

CAPÍTULO III — USO DE APARATOS DE MEDICIÓN PARA CIRCUITOS ELECTRÓNICOS 34

3-1 Introducción — 3-2 Amperímetros — 3-3 Voltímetros — 3-4 Óhmetros — 3-5 Instrumentos múltiples — 3-6 Cuidado y manejo de los instrumentos — 3-7 Aparatos protectores para la seguridad personal y del equipo — 3-8 Resumen

CAPÍTULO IV — RESISTENCIA — LEY DE OHM — CIRCUITOS 48

4-1 Introducción — 4-2 Resistencia eléctrica — 4-3 Ley de Ohm — 4-4 Resumen de la Ley de Ohm — 4-5 Circuitos eléctricos — 4-6 Resumen

CAPÍTULO V — FUNDAMENTOS DEL MAGNETISMO 71

5-1 Introducción — 5-2 Tipos de imanes — 5-3 Polos magnéticos — 5-4 Fuerza magnética — 5-5 Campos magnéticos — 5-6 Formas y usos de los imanes — 5-7 Manejo y cuidado de los imanes — 5-8 Resumen del magnetismo — 5-9 Electromagnetismo — 5-10 Circuitos magnéticos — 5-11 Resumen de electromagnetismo y circuitos magnéticos — 5-12 Inducción electromagnética — 5-13 Motores y generadores simples de corriente continua — 5-14 Resumen

CAPÍTULO VI — INSTRUMENTOS DE MEDIDA 104

6-1 Introducción — 6-2 Mecanismo del medidor — 6-3 El amperímetro básico — 6-4 Voltímetro — 6-5 Óhmetros — 6-6 Instrumento múltiple — 6-7 Voltímetro a válvula — 6-8 Instrumentos especiales — 6-9 Resumen.

CAPÍTULO VII — BATERÍAS 133

7-1 Introducción — 7-2 La pila elemental — 7-3 Combinación de baterías — 7-4 Pilas secundarias — 7-5 Resumen

CAPÍTULO VIII — LEYES DE KIRCHHOFF — ANÁLISIS DE CIRCUITOS DE CORRIENTE CONTINUA 150

8-1 Introducción — 8-2 Leyes de Kirchhoff — 8-3 Aplicación de las leyes de Kirchhoff — 8-4 Aplicación de los circuitos resistivos — 8-5 Resumen

CAPÍTULO IX — INDUCTANCIA 176

9-1 Introducción — 9-2 Autoinducción — 9-3 Efectos de la inductancia en los circuitos de corriente continua — 9-4 Inductancia mutua — 9-5 Inductores conectados en serie y en paralelo — 9-6 Tipos de construcción de inductores — 9-7 Aplicación de los inductores — 9-8 Resumen

PÁG.

CAPITULO X — CAPACITANCIA 203

10-1 Introducción – 10-2 Revisión de los principios electrostáticos – 10-3 Unidades de capacidad – 10-4 Capacitores – 10-5 Sistemas de marcado de capacitores – 10-6 Teoría del funcionamiento del capacitor – 10-7 Efectos de capacidad en circuitos de corriente continua – 10-8 Capacitores combinados – 10-9 Usos y aplicaciones de los capacitores – 10-10 Resumen

Apéndice 229

Bibliografía 233

La presente edición se terminó de imprimir en junio de 1970 en los Talleres Gráficos de la Compañía General Fabril Financiera, S. A., Iriarte 2035, Buenos Aires, República Argentina.